

**CAUSAS NATURALES Y HUMANAS DE LA EROSIÓN
EN LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA.
RESUMEN PARA TOMADORES DE DECISIÓN***

Juan D. Restrepo A.**



* Este documento hace parte de una serie de ocho artículos contratados para presentar en los foros regionales "¿Para dónde va el río Magdalena? Riesgos sociales, ambientales y económicos del proyecto de navegabilidad". Foros que se llevaron a cabo en 2015 en Bogotá (14 de abril), Barranquilla (28 de julio) y Honda (septiembre).

Los documentos se publicarán próximamente en un libro, editado por el Foro Nacional Ambiental y Fescol.

** Ph. D. Profesor-investigador, Escuela de Ciencias, Universidad Eafit. jdrestre@eafit.edu.co

Las implicaciones de la erosión del río Magdalena en el desastre invernal 2010-2011

En los últimos años se ha constatado un apreciable aumento en la frecuencia y magnitud de los procesos peligrosos relacionados con los efectos de las lluvias en la cuenca del río Magdalena, y especialmente en los daños humanos y materiales, directos e indirectos, debidos a los mismos. El invierno de 2010-2011 fue un exponente particularmente acusado de lo que parece ser una tendencia de fondo general. Esto constituye una importante causa de penalidades para la población y tiene también consecuencias fuertemente negativas para la economía y el desarrollo del país.

Diferentes opiniones se han generado en torno a las causas de la emergencia invernal 2010-2011. Mientras algunos columnistas de importantes periódicos sostienen que este desastre invernal fue ocasionado por causas naturales, expertos afirman que el cambio climático es el principal detonante de la tragedia. Contrario a estas dos tendencias de opinión, algunos científicos y columnistas aseguran que el impacto del hombre en la región andina, como producto de la transformación del paisaje por deforestación, minería, ganadería y agricultura, es el factor que ha influido en que este desastre haya superado en varios órdenes de magnitud la intensidad de los eventos invernales que se observan cada año en el país.

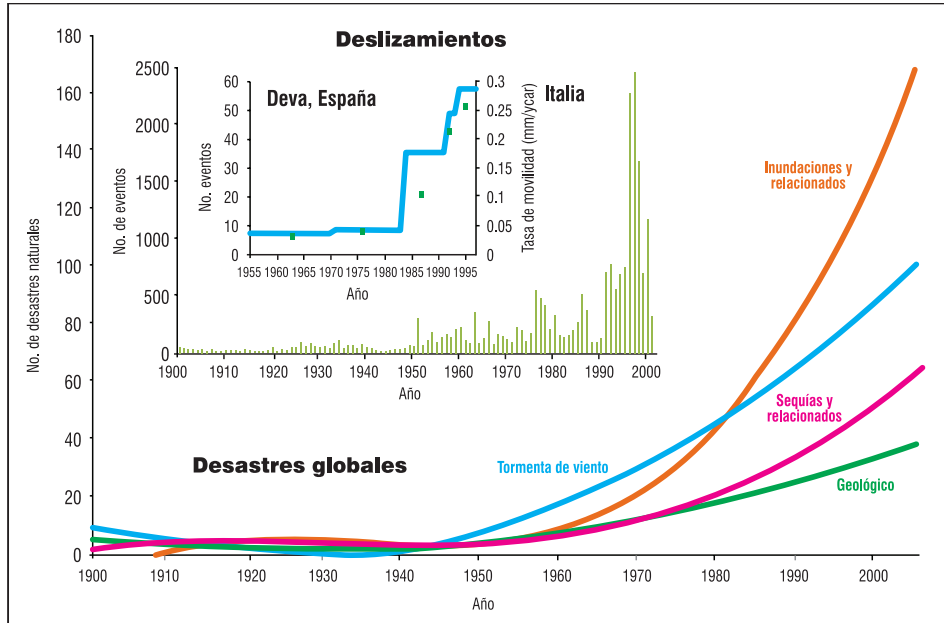
Aunque con frecuencia se atribuye el aumento en este tipo de desastres al cambio climático, existen serias evidencias, tanto en Colombia (Restrepo y Syvitski, 2006; Restrepo, 2008) como globalmente (e.g. Rivas et al., 2006; Bonachea et al., 2010; Syvitski y Kettner, 2011), de que la causa principal son las alteraciones producidas sobre la superficie terrestre por actividades tales

como deforestación, agricultura, minería, expansión urbana y construcción de infraestructura. Visto de otra forma, la aceleración de los procesos hidrogeológicos superficiales en las cuencas hidrográficas, como denudación de los suelos, generación de sedimentos, deslizamientos e inundaciones, colmatación de ríos y masas de agua, pueden ser producto del cambio climático o de la intervención humana, o de ambos factores. Este incremento en los procesos geológicos que afectan la superficie terrestre y que representan alto riesgo en las comunidades ha sido evidente y comprobado a escala global. Todavía, la comunidad científica mundial trabaja para determinar si estamos ante un “cambio geomorfológico global” independiente del cambio climático y que se sumaría a este (Cendrero et al., 2006; Bonachea et al., 2010) (gráfica 1).

Por tanto, y bajo estos escenarios de intervención humana sobre los suelos, es de esperar una reducción considerable de la resiliencia de los sistemas naturales ante distintos agentes desestabilizadores (lluvias intensas y acciones humanas), así como una intensificación de los procesos geológicos superficiales causantes de los desastres. De confirmarse lo anterior, tendría importantes consecuencias para la formulación de estrategias de mitigación de los desastres, ya que el foco de las medidas por implantar no se debería dirigir solo hacia el cambio climático, sino hacia el control en la degradación de los suelos. El primero depende sobre todo de políticas internacionales, mientras que el segundo es mucho más fácil de abordar y gestionar nacionalmente (Cendrero et al., 2004).

Las lluvias que se presentaron durante la ola invernal 2010-2011 fueron causadas por la anomalía climática del fenómeno de la Niña y la localización de la banda nubosa de la zona de convergencia intertropical. Todavía existe gran controversia científica sobre si los cambios en la frecuencia y la magnitud de los eventos Niño o Niña en las últimas cinco décadas son resultado del cambio climático. De lo que no cabe duda alguna es sobre la capacidad de regulación hídrica que tienen los suelos y los bosques. En zonas andinas con relieve muy pronunciado, los bosques y sus suelos son la esponja hídrica que almacena el exceso de precipitación, amortiguando de forma natural la escorrentía que fluye en el ciclo hidrológico hacia los ríos. En estos sistemas montañosos de altas pendientes, la remoción de la cobertura forestal deja expuestos los suelos a la acción de las lluvias y al lavado activo o erosión superficial. En otras palabras, al remover la vegetación, los excesos hídricos en las cuencas fluviales no son filtrados y la escorrentía o caudal se presenta de forma errática o en pulsos, ocasionando las inundaciones de carácter extremo aguas abajo y el incremento en los sedimentos transportados desde las zonas

Gráfica 1. Procesos geológicos superficiales como deslizamientos e inundaciones a escalas local, regional y global durante el último siglo*



* Al observar el número de desastres naturales en el mundo para el último siglo, es evidente el aumento de los eventos después de la década de los cincuenta. Al comparar el número de deslizamientos e inundaciones en tres escalas geográficas diferentes, como una localidad de España, un país entero (Italia) y los datos globales, se observa que los incrementos y sus tendencias son muy similares. Los análisis para España e Italia indican que el cambio climático, expresado en la cantidad y frecuencia de las lluvias, no fue el factor determinante en el aumento de los deslizamientos. Los autores encontraron que este aumento en los procesos geológicos superficiales se debió a la intervención humana en los suelos. Además, los resultados del Panel Intergubernamental del Cambio Climático han mostrado un incremento en la precipitación global del orden de 5-7%. Sin embargo, el incremento en los eventos de inundación y deslizamientos ha sido del orden de 50%. ¿Estamos ante un “cambio geomorfológico global”?

Fuente: tomado de Bonachea et al. 2010. Cortesía de Antonio Cendrero, Universidad de Cantabria, España.

activas de erosión. Las preguntas que surgen y que son motivo de discusión en Colombia son: ¿cuál es la magnitud de la erosión en el río Magdalena? ¿Cuánto porcentaje de la erosión en las cuencas andinas de Colombia es explicado por las actividades humanas? Y ¿cuáles son las implicaciones de esta erosión en las inundaciones durante los eventos invernales?

La magnitud de la erosión en el río Magdalena

Una de las formas de estimar la erosión en las cuencas hidrográficas de forma espacial y regional es la medida de los sedimentos transportados en suspensión por los ríos. Esta cantidad se expresa en toneladas de sedimentos por año (ton año^{-1}). Para estimar cuántos sedimentos provienen de un río específicamente, la medida se realiza en secciones de aforo hidrológico aguas abajo o cerca de la desembocadura del río a otro sistema fluvial o al mar. Si este número del transporte total se divide por el área de la cuenca hidrográfica (km^2) aguas arriba de la estación de aforo, se obtiene la cantidad de sedimentos en toneladas que aporta cada kilómetro cuadrado de la cuenca hidrográfica cada año ($\text{ton km}^{-2} \text{año}^{-1}$).

Desde hace más de diez años, científicos del Departamento de Geología de la Universidad Eafit, con el apoyo de Colciencias, la Universidad de Colorado y Nasa han estado analizando las causas y tendencias (1970-2002) de la erosión en el río Magdalena. Una de las principales preguntas de esta investigación era por qué sus tasas de erosión ($710 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$) son las más altas del continente en comparación con los grandes ríos sudamericanos como Amazonas ($167 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$), Orinoco ($158 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$), Paraná ($43 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y São Francisco ($10 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$). En teoría, varios factores naturales en el Magdalena explicarían estos altos valores: el relieve, expresado en cuencas montañosas con altas pendientes; la gran actividad tectónica; las diferencias espaciales en la composición de los suelos; el clima, con altas variaciones de temperatura y rangos de precipitación entre 500 y 6.000 mm al año; y la capacidad de transporte de sedimentos de los ríos por los moderados y altos caudales.

El análisis espacial de la erosión en la cuenca del Magdalena, en treinta y dos sistemas tributarios principales y más de cincuenta estaciones de aforo (tabla 1), con series de datos sobre transporte de sedimentos entre diez y treinta años, indica que el promedio de erosión en toda la cuenca es de $690 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$, con valores máximos hasta de $2.200 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en la cuenca del río Carare, una de las tasas de erosión más altas en el mundo. Los sitios críticos o “*hot spots*” corresponden a sistemas de la cuenca oriental como Carare, Opón ($1.975 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y Lebrija ($1.260 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$), y ríos como Negro ($1.730 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$), La Miel ($1.250 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$), Saldaña ($1.270 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$), Coello ($1.035 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y Cauca ($830 \text{ ton km}^{-2} \text{ año}^{-1}$) (Restrepo, 2005; Restrepo y Syvitski, 2006; Restrepo et al., 2006a). Este análisis de la distribución

Tabla 1. Factores naturales que controlan la erosión en la cuenca del río Magdalena*

Zona de la cuenca	Ecuación de regresión	N	R ²	Valor-F
Cuenca total	(1) $Y = 0.13 \Delta f^{0.81} Q_{\max}^{-0.39}$	32	0.58	16.15
Cuenca alta	(2) $Y = 107.092 + 0.4227 Q_{\max}$	13	0.75	33.23
Cuenca media	(3) $Y = 3484.95 - 0.5042 H - 38.1722 H_r - 2.3837Q$	10	0.77	6.71
Cordillera Oriental	(4) $Y = 5.4 H^{-2.1} Q^{0.78} r A^{-0.4}$	12	0.82	202.13
A > 10.000 km ²	(5) $Y = 4.4 \Delta f^{0.9} r_{pk}^{-4.9}$	3	0.78	19.83

* El análisis de correlación estadística entre treinta variables hidrológicas, climáticas y morfométricas y la producción de sedimentos, calculados treinta y dos sistemas tributarios del río Magdalena, incluyendo el río Cauca, indica que 58% de la erosión es debida a la escorrentía (Δf) y al caudal máximo (Q_{\max}). En general, la erosión natural se debe en gran parte a los caudales máximos aportados en eventos de corto tiempo. *Esto podría indicar que los suelos de la cuenca tienen menos resiliencia para “amortiguar” o regular las precipitaciones.* La relación entre el caudal y las precipitaciones interanuales, tanto el promedio de lluvia como los eventos extremos de precipitación, no han sido analizadas para la cuenca como tampoco para las zonas críticas con alta degradación en los suelos. *Asumiendo la hipótesis de que las actividades humanas en la cuenca del Magdalena son la causa principal en el incremento de procesos geológicos de alto riesgo como inundaciones y deslizamientos,* es de esperar que la relación lineal entre precipitación versus caudal se apartaría de la tendencia inicial teórica. Es decir, que al experimentar alteración en los suelos, una precipitación dada (sin incremento en el tiempo) produce más caudal que el que se generaba antes de la intervención.

Fuente: tomado de Restrepo y Syvitski, 2006; Restrepo et al., 2006a.

espacial de la erosión no ha evaluado las causas y los factores humanos en la degradación de los suelos de cada cuenca, como producto del cambio en el uso de los mismos, incluyendo actividades como deforestación, ganadería, minería, urbanización y construcción de infraestructura.

Con base en un estudio reciente entre la Universidad Eafit y la Universidad de Colorado, con fondos Nasa para el programa de erosión en cuencas continentales, y publicado en 2010 en *Journal of Geology* (Kettner et al., 2010), el área de la cuenca del Magdalena con valores críticos de erosión es del 78%. En síntesis, tres cuartas partes de la cuenca andina más grande de los Andes del norte están en estado de erosión, incluso, algunos investigadores le llaman estado de desertificación.

Estos índices de erosión fueron calculados con una ponderación numérica que incluye para cada sistema tributario el área de deforestación entre

1975 y 2000, con asignación de valores numéricos diferentes de acuerdo con el porcentaje de variación de la superficie de bosques en el periodo de veinticinco años. Sin embargo, estos valores de erosión no han sido calculados para tasas de deforestación actualizadas, por ejemplo, las disponibles en la última evaluación de deforestación 2000-2010, realizada por el Ideam en 2010. Tampoco, estos indicadores numéricos de erosión han sido estimados a partir de otros factores de actividad humana como minería, agricultura, ganadería y construcción de infraestructura. Un análisis más preciso a escala regional del cambio en el uso de los suelos daría, sin duda alguna, indicadores de erosión más precisos (ver la siguiente sección de los resultados recientes del impacto de la deforestación en la erosión del Magdalena).

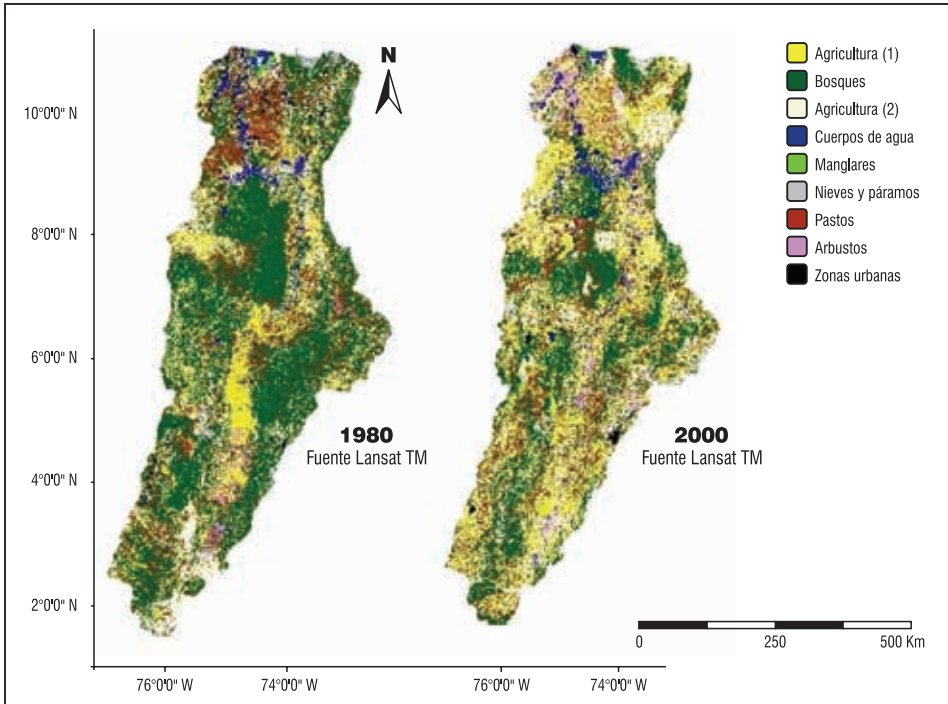
La deforestación como causa central de la erosión

El análisis del cambio en la cobertura forestal de la cuenca del Magdalena entre finales de las décadas de 1970 y 1990 indica que aproximadamente 43% del área de bosques fue talada (mapa 1). Gran parte de estos suelos fueron transformados en áreas de agricultura y ganadería. De hecho, las áreas de bosques transformadas en este periodo se duplicaron. La tasa de deforestación anual fue del 2,1%, valor de deforestación reportado como el más alto entre las cuencas tropicales a nivel mundial (Restrepo y Syvitski, 2006).

Los indicadores de deforestación en Colombia son alarmantes. La última evaluación de deforestación realizada por el Ideam entre 2005 y 2010 muestra una tasa anual de deforestación de 340.000 hectáreas por año, un área de pérdida forestal similar al área del departamento del Atlántico. Al comparar este valor en Colombia con los datos de deforestación global publicados en el estudio de evaluación mundial de los bosques, de la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO, sigla en inglés), Colombia, ocupando solo 0,1% del área continental del mundo, representa el 5% de la deforestación global! En otras palabras, en 2010 nuestro país estaba en los primeros diez lugares de deforestación en el mundo (Restrepo, 2013). No cabe duda que la descomposición de nuestros suelos andinos influye en la erosión y en el incremento del transporte de sedimentos de los ríos colombianos, incluyendo su máximo exponente, el Magdalena.

De acuerdo con el estudio global de cuencas fluviales del Instituto Mundial de los Recursos (WRI, sigla en inglés), la cobertura de bosques en la cuenca del Magdalena era de 90% antes de los asentamientos humanos (Revenge

Mapa I. Mapa de cambio en el uso de los suelos (1980-2000)
para la cuenca del Magdalena*



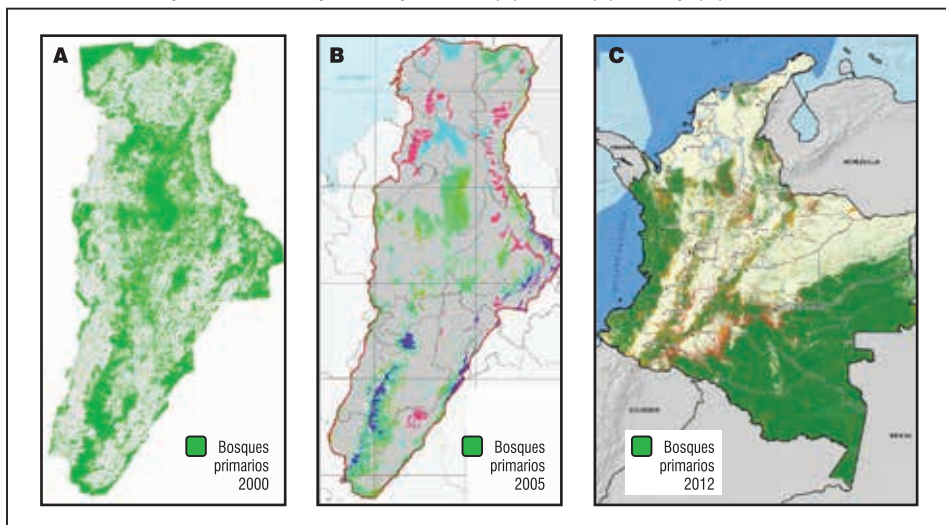
* Obsérvese el incremento para el periodo 2000 de las áreas de agricultura (amarillo) y la reducción de las áreas de bosques (verde).

Fuente: modificado de Restrepo y Syvitski, 2006.

et al., 2000). Otras evaluaciones sobre la deforestación en el Magdalena han mostrado que las áreas naturales de bosques al año 2000 eran del orden de 23% (evaluación de deforestación de TNC, *The Nature Conservancy*, 2012) y de al menos 10% en 2005, este último valor basado en el mapa de ecosistemas presentes en la cuenca del Magdalena por el Instituto Humboldt (Restrepo, 2005) (mapa 2). En general, y desde las décadas de los setenta y ochenta, las tasas de deforestación se han incrementado casi exponencialmente, sin mostrar ninguna desaceleración en las tres últimas décadas.

Mediante la aplicación del modelo numérico BQART (Syvitski y Milliman, 2007), que combina variables climáticas, hidrológicas, litológicas, morfométricas y del impacto humano por deforestación entre 1980 y 2010, modelo ya implementado para la cuenca del río Magdalena mediante el mencionado proyecto entre las universidades Eafit y Colorado-Estados Unidos, con fondos

Mapa 2. Mapas de coberturas boscosas en la cuenca del Magdalena y en Colombia para los periodos (A) 2000, (B) 2005 y (C) 2012



Fuente: tomado de Restrepo, 2005; TNC, 2012; Ideam, 2011.

Nasa para la modelación de la erosión continental (Kettner et al., 2010), se logró estimar con alta confiabilidad estadística el porcentaje del transporte de sedimentos del río Magdalena debido a la deforestación.

Los valores de deforestación 1980-2000 y 2000-2010 fueron acoplados al modelo BQART para la simulación del transporte de sedimentos para el periodo 1980-2010. Los resultados en la cuenca del Magdalena muestran que el modelo explica el 86% de la varianza en el transporte de sedimentos una vez todas las variables naturales y humanas están incluidas en la simulación; la varianza explicada en los aportes de sedimentos sin incluir la influencia antrópica ajustada numéricamente con los índices de deforestación, es de 77%. En otras palabras, la deforestación explica 9% del transporte de sedimentos en la cuenca durante las últimas tres décadas.

El análisis interdecadal de la sumatoria de los aportes simulados de sedimentos debidos a la deforestación en cada subcuenca tributaria indica que durante las tres últimas décadas un total de 417 millones de toneladas de sedimentos fueron generados por las actividades de tala de bosques. Para la década 2000-2010, la producción combinada de sedimentos de la cuenca por deforestación es de 160 millones de toneladas, valor cercano al transporte anual del Magdalena en la estación más aguas abajo de Calamar.

La producción anual de sedimentos en el Magdalena por deforestación durante la década 2000-2010, de 16'000.000 de toneladas/año, es cercana al aporte anual del río Patía, valor de descarga de sedimentos más alto de todo el Pacífico americano (Restrepo, 2012; Restrepo y Kettner, 2012;). En otras palabras, el río Magdalena transporta cada año a las zonas bajas de inundación de la depresión Momposina, canal del Dique y su delta en bocas de Ceniza, un río Patía por deforestación. También, es importante resaltar que las cuencas tributarias como Cauca, Suárez, Sogamoso y Carare, han transportado durante los últimos diez años un orden de magnitud más de sedimentos en comparación con los otros tributarios.

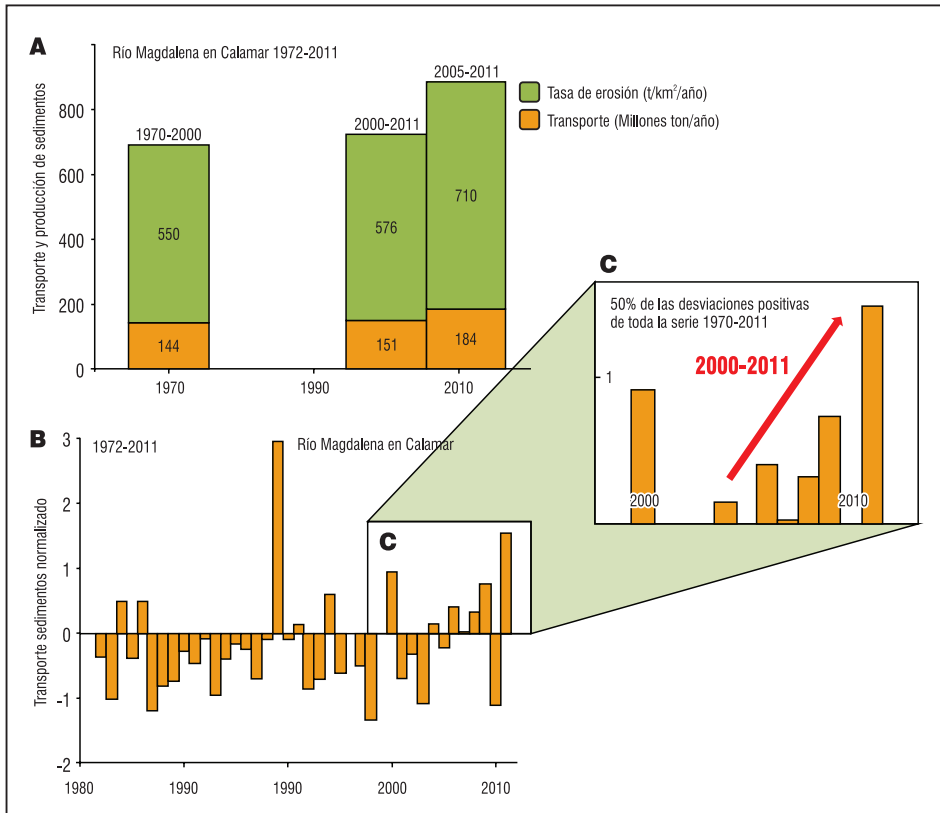
Tendencias del transporte de sedimentos del río Magdalena, 1970-2011

Los siguientes datos sobre el transporte de sedimentos del río Magdalena en la estación más aguas abajo en Calamar para el periodo 1972-2011 se muestran como una herramienta para establecer conexiones temporales e interdecadales de las posibles relaciones entre tendencias e impactos humanos en la cuenca.

Las tendencias ascendentes en los aportes fluviales, caudal y sedimentos, fueron todas estadísticamente representativas. De hecho, las tendencias de los aportes fueron mucho más pronunciadas para el periodo 2005-2011. Por ejemplo, el caudal promedio de $7.156 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para el periodo 1940-1999, se incrementó a $8.833 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ entre los años 2005 y 2011, un aumento de $1.677 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ o del 24% con respecto al promedio interanual de la serie completa 1940-2011. En relación con el transporte de sedimentos, estas tendencias ascendentes fueron igualmente representativas, mostrando un aumento de 100.000 toneladas/día para el periodo 2005-2011 en relación con el promedio 1972-2000.

Entre 2005 y 2011, el transporte anual del Magdalena en Calamar se ha incrementado en un 32% con respecto al promedio 1970-2000, es decir, un aumento de 44 millones de toneladas/año (gráfica 2). Este ascenso en el transporte coincide con las tendencias ascendentes de deforestación en Colombia para los años 2005-2010. *Al convertir el transporte de sedimentos anual del Magdalena en Calamar en número de volquetas de seis toneladas, dado un valor específico de densidad de los sedimentos, el Magdalena transporta en Calamar 15'000.000 de volquetas anuales o 40.000 volquetas/día, para un promedio de 1.650 volquetas/hora.* De otro lado, el análisis de las desviacio-

Gráfica 2. (A) Aportes de sedimentos en suspensión y producción de sedimentos del río Magdalena en la estación Calamar para las décadas 1972-2000 y 2000-2011; (B-C) Serie de tiempo de transporte en suspensión normalizado entre 1972 y 2011



nes del transporte de sedimentos del Magdalena en Calamar para el periodo 1970-2011 indica que aproximadamente el 60% de las desviaciones positivas se han presentado entre 2000 y 2011. Estos resultados preliminares indican que el Magdalena es el sistema fluvial del continente americano con las tasas de erosión más altas por kilómetro cuadrado de área hidrográfica para el periodo 2005-2011.

Indicadores ambientales y económicos en el Magdalena

El desempeño ambiental de Colombia en la última década ha sido medido por varias bases de datos globales en términos de índices de desempeño, cambios forestales y conflictos ambientales. El EPI (*Environmental Performance Index*),

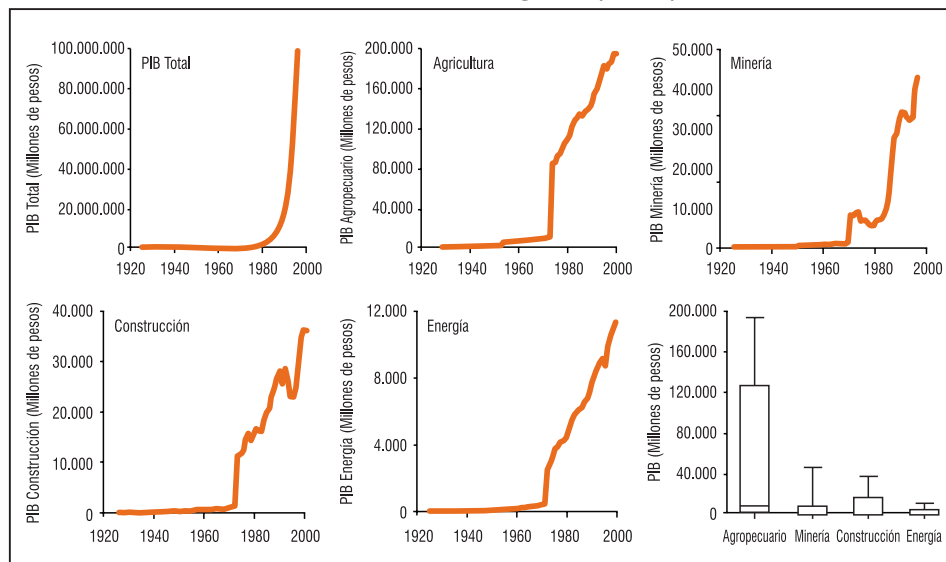
de la Universidad de Yale, clasifica a Colombia en el puesto global 85 con una calificación general de 50,77 sobre 100 (EPI, 2014). En las áreas de manejo y cambio en las coberturas de los bosques como también de los recursos hídricos, las calificaciones de 26,26 y 4,6, respectivamente, dan muestra de la degradación ambiental de las cuencas hidrográficas. Por su parte, la base global de deforestación, *Global Forest Watch* (GFW, 2014), indica que solo queda 14% de la cobertura forestal primaria en todo el país. El área total de deforestación al año 2012 fue de 197.000 hectáreas. Por último, el Atlas Global de Justicia Ambiental (EJA, 2014) sitúa a Colombia en el segundo puesto de países con mayores conflictos ambientales. Los datos muestran que en el país han ocurrido setenta y dos conflictos ambientales, generados principalmente por actividades extractivas de recursos mineros, biomasa forestal y energía fósil.

Al observar los indicadores económicos en la cuenca del Magdalena que generan cambio en el uso de los suelos, incluyendo agricultura, minería, urbanización y electricidad, en términos de su contribución al PIB nacional, es evidente que la agricultura, seguida por la urbanización, son las actividades de origen humano que han transformado en mayor escala los suelos de la cuenca del Magdalena. Incluso, estas transformaciones comienzan en la década de los setenta en el sector agrícola y en los años ochenta para la extracción minera (Restrepo, 2013) (gráfica 3).

Diferentes evaluaciones sobre deforestación en países tropicales han resaltado cómo gran parte de la pérdida forestal en los trópicos es causada por la transformación de suelos a zonas agrícolas. Geist y Lambin (2002) reportan que 96% de la tala de bosques en Latinoamérica es causada por las actividades de agricultura. Recientemente, Ferretti-Gallon y Busch (2014) han encontrado en un análisis de más de ciento diecisiete estudios econométricos que 58% de la deforestación global actual ocurre en los trópicos debido al mayor retorno económico de la agricultura y el pastoreo.

De acuerdo con el *Environmental Justice Atlas* (EJA, 2014), existe una clara conexión entre el número e intensidad de los conflictos ambientales y el modelo económico extractivo de los últimos gobiernos en Colombia. La inversión foránea pasó de 1.444 millones de dólares en 1994 a 15.612 millones en 2012. Por ejemplo, el sector extractivo de recursos naturales presentó un incremento de 14% a 55% en el mismo periodo. El sector minero aumentó su participación en el PIB nacional de 2 a 11% entre 1979 y 2012. En general, 64% del total de las exportaciones del país en la última década ha sido generado por el sector minero-energético.

Gráfica 3. Contribución al PIB nacional de las actividades de origen humano que generan cambios en el uso de los suelos en la cuenca del Magdalena para el periodo 1935-2005



Fuente: datos de Indicadores económicos del Banco de la República, modificado de Restrepo, 2013.

Análisis de los costos de la degradación de los suelos y, por ende, la erosión en Colombia, no han sido calculados o publicados. En el reporte del Banco Mundial sobre las prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia, Sánchez-Triana et al. (2007) señalan que los costos de la erosión de los suelos podrían ser del orden de los 3.000 millones por año. Sin embargo, los autores afirman que estos valores serían aún mucho mayores debido a la escasez de bases de datos de deslizamientos e inundaciones y otros cálculos asociados con los servicios ecosistémicos y de infraestructura. Por su parte, la ex viceministra de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Adriana Soto (*Semana Sostenible*, junio de 2014), estima que los costos de la deterioración de una hectárea de suelo son del orden de 5.000 dólares. Debido a que entre 1999 y 2010 se han deforestado cerca de 6'000.000 de hectáreas, el valor total de restauración estaría cerca de 30.000 millones de dólares, aproximadamente el 8% del PIB nacional al año 2013.

No es casualidad afirmar que gran parte de todas estas realidades ambientales son en su mayoría resultado de las actividades humanas en el Magdalena dados sus indicadores económicos y poblacionales. De acuerdo con TNC, *The Nature Conservancy*, 86% del PIB se produce en la cuenca, repre-

sentado a escala nacional por el 75% de la producción agrícola, 70% de la hidroelectricidad, 90% de la energía térmica y 80% de la producción de carbón. De hecho, 30'000.000 de habitantes están en la cuenca, cerca del 80% de la población del país.

Recomendaciones de ciencia aplicada a la toma de decisiones

Globalmente existe la certeza de que en las últimas cinco décadas las tasas de sedimentación, deslizamientos e inundaciones se han incrementado diez veces. Este incremento de forma exponencial desde 1950, es muy similar al incremento mundial del PIB. La variación de las precipitaciones totales debida al cambio climático, uno de los principales agentes en la ocurrencia de desastres naturales, ha variado entre 5% y 7% a escala global. La presión humana sobre la superficie terrestre ha aumentado la frecuencia y recurrencia de eventos extremos y de alto riesgo. De hecho, la llamada denudación tecnológica de los suelos explica las pérdidas superficiales de estos del orden de 1 mm/año, mientras que a los procesos naturales se les asigna solo 0,1 mm/año. En otras palabras, la influencia humana en la erosión superficial de los suelos es un orden de magnitud mayor que la debida a las variables de origen natural.

El informe ambiental de Colombia para la reducción de la pobreza del Banco Mundial, publicado en 2008, afirma que los costos de la erosión de Colombia pueden ser del orden de 3.000 millones al año. Los autores aclaran que esta cantidad tiene un gran sesgo y que incluso este valor debería ser mayor. El mismo informe concluye que en Colombia hay ausencia de normas, leyes y políticas ambientales para controlar y mitigar la erosión.

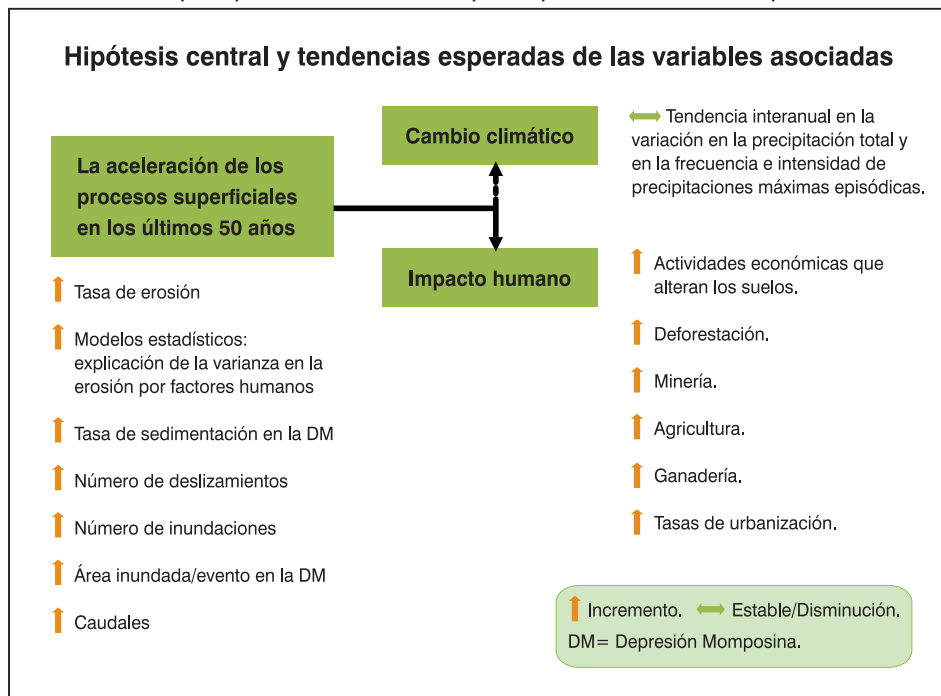
Como se mencionó anteriormente, algunos expertos en el país sostienen que la recurrencia de inundaciones en los principales ríos del país ha sido ocasionada por causas naturales. Otros afirman que el cambio climático es el principal detonante de la tragedia. Contrario a estas dos tendencias de opinión, hay razones científicas para afirmar que el impacto del hombre en la región andina, como producto de la transformación del paisaje por deforestación, minería, ganadería y agricultura, es el factor más determinante para que este desastre haya superado en varios órdenes de magnitud la intensidad de los eventos invernales que se observan cada año en el país.

No cabe duda alguna de que ante la alteración superficial de los suelos debida a las actividades humanas, la resiliencia de estos en la regulación hí-

drica o “amortiguación” de la escorrentía superficial disminuye. Por ende, es de esperar que ante eventos de precipitación promedio, los caudales se comporten más erráticamente o en “pulsos”, y como resultado, las áreas y eventos de inundación se incrementen.

En el contexto anterior, las cuencas hidrográficas del país, incluyendo su máximo exponente, el Magdalena, deberían ser analizadas ambientalmente a escala regional y con el planteamiento de hipótesis centrales en relación con la degradación de los suelos como: “el incremento en los procesos geológicos de alto riesgo como erosión, inundaciones y deslizamientos durante los últimos cincuenta años se debe a la intervención humana en la cuenca, la cual ha alterado el ciclo hidrológico de los suelos y disminuido los niveles de resiliencia de las zonas hidrográficas ante el cambio climático” (gráfica 4). Para resolver esta hipótesis se requieren proyectos transdisciplinarios que conjuguen disciplinas como hidrología, geología, economía ambiental, evaluaciones de servicios ecosistémicos, biodiversidad, ingeniería ambiental, entre otras, y no solo ingeniería “gris” e hidráulica.

Gráfica 4. Hipótesis central sobre las causas de la erosión en el Magdalena y tendencias esperadas de las principales variables naturales y antrópicas asociadas con la hipótesis



La degradación ambiental de gran parte del país es arrastrada aguas abajo del río Magdalena y transferida a la depresión Momposina, la Mojana, el canal del Dique, bocas de Ceniza y sistemas lagunares y marinos terminales, en términos de crecientes aportes de agua, sedimentos y contaminantes. *La cuenca Magdalena requiere el planteamiento de un sistema integrado de análisis y control ambiental*, incluyendo componentes como deforestación, erosión de suelos, actividades mineras, diseño y ejecución de infraestructuras, construcción, y estrategias de control de la escorrentía y el aporte de sedimentos, así como de mitigación de inundaciones. *Este modelo integrado, tomando la cuenca hidrográfica como un sistema continuo desde la cabecera hasta la desembocadura*, daría las pautas para comprender y mitigar los procesos de inundación y sedimentación, analizar la transferencia de impactos aguas abajo a otros sistemas estratégicos lagunares y costeros, y generar análisis transdisciplinarios para planes de ordenamiento y gestión regional y ambiental. En el contexto de la hipótesis general mencionada, algunas preguntas aún sin resolver para el Magdalena y la gran parte de los ríos del país, incluyen:

- ♦ ¿El incremento en los procesos geológicos de alto riesgo como erosión, inundaciones (en términos del aumento de áreas de inundación/evento) y deslizamientos se debe al cambio climático o a nuestra intervención en la superficie terrestre?
- ♦ ¿Cómo ha variado la intervención en los suelos de la cuenca durante los últimos cincuenta años?
- ♦ ¿Cuánto porcentaje de la erosión para el periodo 1975-2010 es debido a las actividades humanas como deforestación, agricultura, ganadería, minería y expansión urbana?
- ♦ Ante los indicadores humanos identificados como responsables de la degradación de los suelos, ¿cuáles son los factores principales de mitigación?

Después de las últimas emergencias invernales en Colombia, el gobierno está identificando las líneas de investigación fundamentales que sirvan de base para hacer más eficientes las inversiones de capital en mitigación de inundaciones o en infraestructura fluvial, incluyendo diques, puentes y defensas hidráulicas. Si algo es cierto es que el país pide inversión ya mismo, pero para que esta no se malgaste *se requieren proyectos de investigación ambiental que permitan poner en práctica soluciones de largo plazo, que aborden las causas*

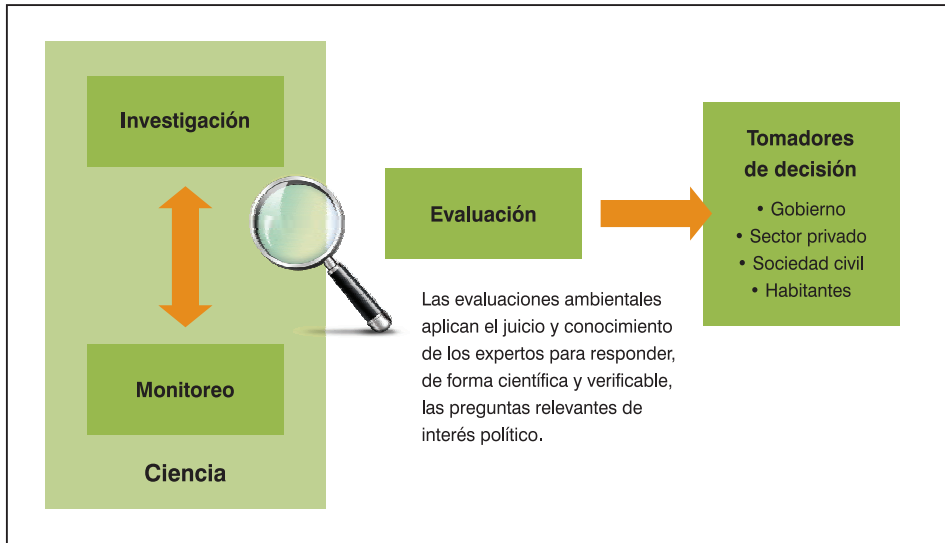
de las inundaciones de los ríos colombianos, no simplemente los síntomas. “Después de la atención de la emergencia, el primer paso para una solución sostenible sería un adecuado entendimiento de lo que ha sucedido. Un poco de historia podría servir para no repetirla” (*El Espectador*. “Editorial”. 1 de mayo de 2011).

El factor sorpresa con el cual se presentó la emergencia invernal 2010-2011 mostró las debilidades del modelo ambiental colombiano representado en el Sistema Nacional Ambiental (Sina). Según el *Departamento Nacional de Planeación*, algunas de estas deficiencias del Sina incluyen el enfoque de tipo emergencia de las políticas de gestión de desastres, la escasa investigación, el atraso en desarrollo tecnológico, la poca participación de la academia colombiana, y la limitada coordinación entre entidades como las CAR, el Ideam, el Minambiente, los entes territoriales o gobernaciones, entre otros. Por citar un ejemplo de la falta de políticas claras en el manejo de los ríos en Colombia, la pregunta por formular es: ¿quién es el responsable del manejo hídrico en Colombia?

Con el propósito de lograr la transferencia del conocimiento científico a los encargados de adoptar políticas y decisiones ambientales en Colombia, por ejemplo el Sistema Nacional Ambiental, los proyectos de investigación deberían adoptar el modelo de comunicación y transferencia de conocimiento de las evaluaciones ambientales globales, por ejemplo, el proyecto de las Naciones Unidas-Ecosistemas del milenio (gráfica 5). Por tanto, fuera de los análisis y resultados científicos, *los productos deben estar dirigidos al sector gobierno, en términos de la identificación de factores de mitigación, incluyendo:*

- ♦ Análisis de factores de mitigación de corto plazo en las subcuencas en estado crítico de degradación de los suelos.
- ♦ Revisión de las políticas ambientales en el control de la degradación de los suelos y evaluación preliminar de su cumplimiento en las zonas críticas identificadas.
- ♦ Escenarios de erosión en la cuenca al año 2050 bajo diferentes estados de impacto ambiental en los suelos.
- ♦ Recomendaciones ambientales para el control de la erosión a mediano y largo plazo.
- ♦ Planteamiento metodológico y organizacional para generar un plan de monitoreo de la erosión en la cuenca del Magdalena.

Gráfica 5. Marco conceptual de la conexión entre ciencia y tomadores de decisión

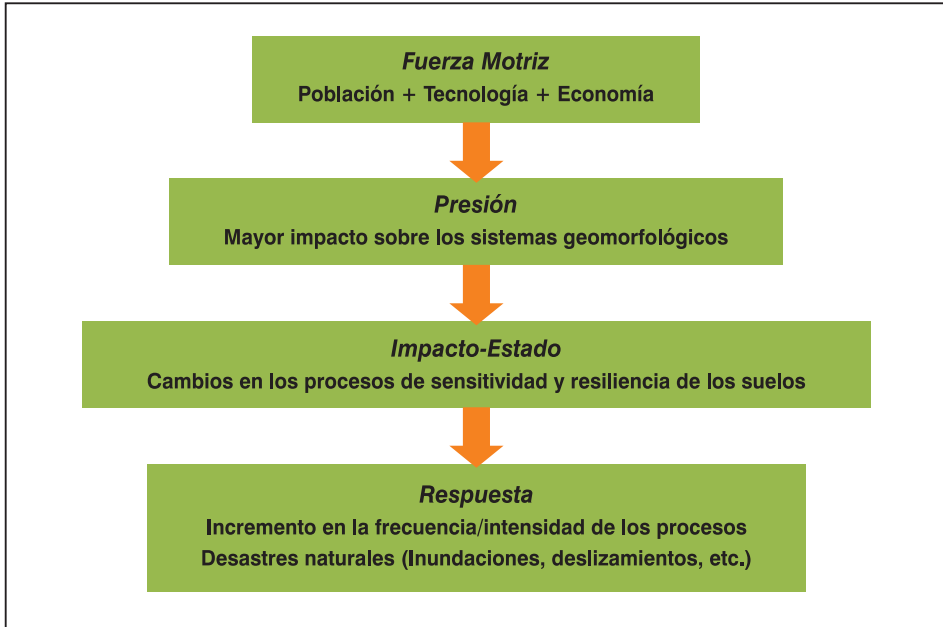


Fuente: tomado de Ecosistemas del milenio.

El marco general del enfoque metodológico de proyectos a escala regional de la cuenca del Magdalena se debería basar en el modelo conceptual FM-P-E-I-R (fuerza motriz, presión, estado, impacto, respuesta), formulado para explicar las relaciones entre acciones humanas y procesos naturales (gráfica 6). Este modelo ha sido utilizado en evaluaciones ambientales globales (p. ej., Ecosistemas del milenio, Panel Intergubernamental del Cambio Climático, Proyecto Global del Agua “International Water Project”-Universidad de las Naciones Unidas y el GEF), en estudios a escala continental sobre el estado de las cuencas hidrográficas (International Geosphere, Biosphere Program en sus programas de cuencas europeas “European Catchments”, africanas, “African Catchments”, del Caribe, “Caribas Caribbean Catchments” y Sudamérica, “Sambas South American Catchments”), y en evaluaciones de la degradación de los suelos a escala de país, por ejemplo, España (Cendrero et al., 2006) y Argentina-Brasil (Bonachea et al., 2010).

Los análisis de las tendencias de los aportes fluviales del Magdalena en la estación más aguas abajo de Calamar demuestran que los incrementos en el caudal y el transporte de sedimentos del Magdalena han sido más pronunciados durante la última década. Estos resultados coinciden con la evaluación general de los aportes de los ríos del Caribe colombiano, los cuales han presentado aumentos significativos en el caudal para el periodo posterior al

Gráfica 6. Modelo conceptual FM-P-E-I-R (fuerza motriz, presión, estado, impacto, respuesta), formulado para explicar las relaciones entre acciones humanas y procesos naturales



Fuente: tomado y modificado de Cendrero et al., 2006.

año 2000 (Restrepo et al., 2014). Por lo tanto, los ríos drenando los Andes del norte están experimentando ascensos en los caudales sin mostrar sus cuencas aumentos interanuales en los valores de precipitación. El análisis de las tendencias de precipitación en Colombia (Carmona y Poveda, 2014) indica que en la región central de los Andes no existe una tendencia uniforme de aumento o reducción de la precipitación. La prueba de la hipótesis de que los ríos están transportando mayores niveles de escorrentía debido al cambio climático está aún por comprobarse.

Para entender si las tendencias interanuales en el caudal y el transporte de sedimentos tienen relación con el cambio climático, se deben realizar análisis de series de tiempo de precipitación total y de frecuencia/intensidad de los episodios extremos de precipitación para los últimos cincuenta años en cada subcuenca tributaria del Magdalena a analizar. Con el fin de relacionar espacial y temporalmente las tasas de cambio en caudal y transporte de sedimentos desde la cuenca del Magdalena con los indicadores de variabilidad climática como precipitación, temperatura del aire y caudales, se deberían

analizar los resultados recientes de tendencias de largo plazo de series hidroclimáticas en Colombia, incluyendo Carmona y Poveda (2014).

En conclusión, los problemas ambientales de gran parte del país son transferidos aguas abajo y depositados en la depresión Momposina y la Mojana en términos de aportes de agua, sedimentos y contaminantes. La cuenca Magdalena-Cauca requiere el planteamiento de un sistema integrado de análisis y control ambiental, incluyendo componentes como deforestación, erosión de suelos, transporte de sedimentos y estrategias de control y mitigación de inundaciones. Este modelo integrado, tomando la cuenca hidrográfica como un sistema continuo desde aguas arriba hasta su desembocadura en el Caribe, daría las pautas para entender hidráulicamente el sistema de inundación y su proyección en el tiempo, información prioritaria para planes de ordenamiento regional y ambiental. ¿Cómo controlar las inundaciones? ¿Por qué se han vuelto tan extremas? ¿Por qué la depresión y la Mojana se inundan con más frecuencia hoy que antes? ¿Hasta cuándo seguirá este comportamiento? ¿Se intensificarán las inundaciones en el futuro? ¿Cuánto tiempo le queda a la depresión Momposina para llenarse de sedimentos? ¿Cuáles serían las implicaciones futuras de esta situación? Las respuestas a estas preguntas, que por supuesto no se conocen, son la base para fijar los planes nacionales de ordenamiento ambiental y mitigación de desastres.

En Colombia, el cambio climático y la degradación ambiental no dan espera. Hay que empezar ya a generar las bases científicas antes de hacer obras hidráulicas y seguir enterrando miles de millones de pesos en la depresión y la Mojana, a la misma tasa o mayor que la acumulación de los sedimentos provenientes de la erosión del río Magdalena.

Conclusiones sobre los sedimentos del Magdalena para planes de política pública ambiental

La cuenca Magdalena requiere el planteamiento de un sistema integrado de análisis y control ambiental, incluyendo componentes como deforestación, erosión de suelos, actividades mineras, diseño y ejecución de infraestructuras, construcción, y estrategias de control de la escorrentía y el aporte de sedimentos, así como de mitigación de inundaciones. Este modelo integrado, tomando la cuenca hidrográfica como un sistema continuo desde la cabecera hasta la desembocadura, daría las pautas para comprender y mitigar los procesos de inundación y sedimentación, analizar la transferencia de impac-

tos aguas abajo a otros sistemas estratégicos lagunares y costeros, y generar análisis transdisciplinarios para planes de ordenamiento y gestión regional y ambiental.

Los proyectos de infraestructura y adecuación hidráulica en el río Magdalena son desarrollados sin visión integral de cuenca, de las áreas críticas de producción de sedimentos, sin modelos geomorfológicos de evolución de ambientes (canales, meandros, planos de inundación) y de visión estratigráfica 3D de variabilidad de ambientes. La cuenca del río Magdalena y su cauce principal son una de las áreas hidrográficas menos estudiadas y analizadas globalmente en cuanto a la evolución de sus ambientes. Se puede afirmar que más del 80% del río y de su cuenca no se conocen científicamente en relación con la evolución de canales, de zonas de inundación, de barras e islas y de otros ambientes fluviales. Si no existen modelos físicos de los ambientes fluviales, ¿cómo se puede predecir la factibilidad de las obras de intervención de la “ingeniería gris”?

La falta de visión de cuenca ha ocasionado que el río sea analizado por quienes ejecutan obras civiles como un “canal hidráulico” y no como la interacción de diferentes ambientes geológicos y biológicos. Este sesgo en el conocimiento del río y de su cuenca no ha permitido que proyectos como el actual de navegabilidad involucren en sus análisis de factibilidad estudios sobre la producción de sedimentos, de zonas críticas de aportes sedimentarios, y del impacto de la deforestación y de cambios de uso del suelo en la generación de sedimentos.

El río Magdalena está clasificado entre los diez mayores productores de sedimentos del mundo. Los procesos naturales explican más del 70% de la producción de sedimentos. Esto indica que el Magdalena, un río joven geológicamente, seguirá produciendo gran cantidad de sedimentos, incluso si controláramos la degradación ambiental de su cuenca y/o reforestáramos todas las zonas degradadas. Los escenarios de erosión no son contemplados en las proyecciones futuras de las obras de infraestructura y del dragado de canales. Ante lo anterior, ¿cuáles serían los escenarios del volumen de dragados y sus costos asociados bajo diferentes escenarios de producción de sedimentos desde las partes alta, media y baja de la cuenca del Magdalena? Estas y otras preguntas importantes deberían ser parte de los estudios de navegabilidad e intervención en el río Magdalena.

El deficiente Sistema Nacional Ambiental (Sina), basado en un enfoque de tipo emergencia en las políticas de gestión de desastres, está caracterizado

por la escasa investigación, el atraso en desarrollo tecnológico y la poca o nula participación de la academia colombiana. Con el propósito de lograr la transferencia del conocimiento científico de los sedimentos del Magdalena a los encargados de adoptar políticas y decisiones ambientales en Colombia, se requiere la participación de la academia colombiana para: 1) analizar los factores de mitigación de corto plazo en las subcuencas en estado crítico de degradación de los suelos; 2) revisar las políticas ambientales en el control de la degradación de los suelos y evaluación preliminar de su cumplimiento en las zonas críticas identificadas; 3) definir escenarios de erosión en la cuenca al año 2050 bajo diferentes estados de impacto ambiental en los suelos; 4) generar recomendaciones ambientales para el control de la erosión a mediano y largo plazo; y 5) desarrollar un marco metodológico y organizacional para generar un plan de monitoreo de la erosión en la cuenca del Magdalena.

Las decisiones costo-beneficio de los proyectos de intervención civil en los ríos colombianos se deberían basar en ciencia transdisciplinaria y no solo en proyectos de ingeniería “gris”. La evaluación económica de los servicios ecosistémicos de los diferentes ambientes fluviales debería ser parte de la ecuación de decisión. La excusa “política” del cambio climático ha permeado el Sina y la opinión pública colombiana.

Créditos a las entidades que han patrocinado la investigación en el Magdalena

Los estudios sobre las causas de la erosión en la cuenca del río Magdalena han sido financiados por Colciencias (2004-2008), fondos Nasa para la simulación del transporte de sedimentos mediante el proyecto *Inter-disciplinary Research in Earth Science program* (NNH06ZDA001N-IDS) (2009-2010) con la Universidad de Colorado Boulder, y el proyecto Unesco de Ríos Tropicales IGCP 582 (2007-2013). Los resultados presentados en este documento sobre la simulación del aporte de la deforestación en el transporte de sedimentos de la cuenca del Magdalena para el periodo 1980-2010 están financiados por el proyecto actual titulado “La erosión en el río Magdalena debida a la deforestación 1950-2010: tasas históricas y simulación”, financiado por el Fondo para la Investigación de la Ciencia y la Tecnología del Banco de la República (No. 3.276 periodo 2014-2015).

Referencias

- BONACHEA, J., VIOLA, M., BRUSCHI, M.A., HURTADO, L., FORTE, L.M., DA SILVA, M., ETCHEVERRY, R., CAVALLOTTO, J., MARCILENE, F., DANTAS, O., LÁZARO, V., ZUQUETTE, M. A., BEZERRA, O., REMONDO, J., RIVAS, V., GÓMEZ-AROZAMENA, J., FERNÁNDEZ, G., CENDRERO, A. 2010. “Natural and human forcing in recent geomorphic change; case studies in the Rio de la Plata basin”. *Science of the Total Environment*. 408.
- CARMONA, A. M., POVEDA, G. 2014. “Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition”. *Climate Change*. DOI 10.1007/s/10584-013-1046-3.
- CENDRERO, A., RIVAS, V., REMONDO, J. 2004. “Influencia humana sobre los procesos geológicos superficiales; consecuencias ambientales”. En J. M. Naredo (ed.). *Incidencia de la especie humana sobre la Tierra*. Colección Economía y Naturaleza. Fundación César Manrique. Lanzarote.
- CENDRERO, A., REMONDO, J., BONACHEA, J., RIVAS, V., SOTO, J. 2006. “Sensitivity of landscape evolution and geomorphic processes to direct and indirect human influence”. *Geogr. Fis. Geodin. Cuatern*. 29.
- EJA-ENVIRONMENTAL JUSTICE ATLAS. 2014. <http://ejatlas.org/>
- EPI-ENVIRONMENTAL PERFORMANCE INDEX. 2014. <http://epi.yale.edu/epi>
- FAO. 2010. *State of the World's forests 2009*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Report 117.
- FERRETTI-GALLON, K., BUSCH, J. 2014. “What drives deforestation and what stops it? A meta-analysis of spatially explicit econometric Studies”. *Center for Global Development Working Paper*. 361.
- GEIST, H. J., LAMBIN, E. F. 2002. “Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation”. *Bioscience*. 52.
- GWF-GLOBAL FOREST WATCH. 2014. <http://www.globalforestwatch.org/>
- IDEAM. 2011. *Memoria técnica de la cuantificación de la deforestación histórica nacional -escala gruesa y fina*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-Ideam. Bogotá.
- KETTNER, A., RESTREPO, J.D., SYVITSKI, J.P.M. 2010. “Simulating spatial variability of sediment fluxes in an Andean drainage basin, the Magdalena River”. *Journal of Geology*. 118.

- RESTREPO, J. D. 2005. *Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental*. Fondo Editorial Universidad Eafit. Medellín.
- , 2008. "Applicability of LOICZ Catchment-Coast Continuum in a Major Caribbean Basin: The Magdalena River, Colombia". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 77.
- , 2012. "Assessing the effect of sea-level change and human activities on a major delta on the Pacific coast of northern South America: The Patía River". *Geomorphology*. doi:10.1016/j.geomorph.2012.02.004
- , 2013. "The perils of human activity on South American deltas: Lessons from Colombia's experience with soil erosion". En *Deltas: Landforms, Ecosystems and Human Activities*. IAHS Publ. 358.
- RESTREPO, J. D., SYVITSKI, J. P. M. 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.
- RESTREPO, J. D., KJERFVE, B., RESTREPO, J.C., HERMELIN, M. 2006a. "Factors Controlling Sediment Yield from a Major South American Drainage Basin: The Magdalena River, Colombia". *Journal of Hydrology*. 316.
- RESTREPO, J. D., ZAPATA, P., DÍAZ, J. M., GARZÓN, J., GARCÍA, C. 2006b. "Fluvial Fluxes into the Caribbean Sea and their Impact on Coastal Ecosystems: The Magdalena River, Colombia". *Global and Planetary Change*. 50.
- RESTREPO, J. D., KETTNER, A. 2012. "Human induced discharge diversion in a tropical delta and its environmental implications: The Patía River, Colombia". *Journal of Hydrology*. 424.
- RESTREPO, J., ORTIZ, J. C., PIERINI, J., SCHROTTKE, K., MAZA, M., OTERO, L., AGUIRRE, J. 2014. "Freshwater discharge into the Caribbean Sea from the rivers of Northwestern South America (Colombia): Magnitude, variability and recent changes". *Journal of Hydrology*. 509.
- REVENGA, C., BRUNNER, J., HENNINGER, N., KASSEM, K., PAYNE, R. 2000. "Pilot Analysis of Global Ecosystems: Freshwater Systems". World Resource Institute. 65. <http://www.wri.org/wr2000>.
- RIVAS, V., CENDRERO, A., HURTADO, M., CABRAL, M., GIMÉNEZ, J., FORTE, L., DEL RÍO, L., CANTÚ, M., BECKER, A. 2006. "Geomorphic consequences of urban development and mining activities; an analysis of study areas in Spain and Argentina". *Geomorphology*. 73.

- SÁNCHEZ-TRIANA, E., AHMED, K., AWE, Y. 2007. "Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia: un análisis ambiental del país para Colombia". Informe del Banco Mundial, Direcciones para el Desarrollo, medio ambiente y desarrollo sustentable. Report No. 38610, 522.
- SYVITSKI, J. P. M., KETTNER, A. J. 2011. "Sediment Flux and the Anthropocene". *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 369.
- SYVITSKI, J. P. M., 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.
- TNC (THE NATURE CONSERVANCY). 2012. "Hacia una gestión integral de la cuenca y planicies inundables del Magdalena-Cauca". Conferencia Fondo Nacional de Adaptación, Cartagena, octubre de 2012. Cortesía de Thomas Walchsburger.