



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Perspectivas de la gestión actual de sedimentos en nueve países de las Américas





Organización de las Naciones Unidas
para la Educación, la Ciencia y la Cultura

Programa Hidrológico Intergubernamental
Grupo de Trabajo para la Iniciativa Internacional
de Sedimentos (ISI) en América Latina y el Caribe

Perspectivas de la gestión actual de sedimentos en nueve países de las Américas

Argentina, Brasil, Chile, Costa Rica, Cuba, México,
Perú y Uruguay. Con la experiencia de Estados Unidos



EDITORES

Pablo A. García-Chevesich, Ph. D.

Colorado School of Mines, Department of Civil and Environmental Engineering UNESCO.
Programa Hidrológico Intergubernamental. Iniciativa Internacional de Sedimentos (ISI)
Centro para Minería Sostenible. Arequipa, Perú.

Roberto Pizarro Tapia, Ph. D.

Universidad de Talca. Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental.
Cátedra UNESCO Hidrología de Superficies

Christoph Lehmann, Ph. D.

Hydrologie – Wasserbau. CH-3322 Urtenen-Schoenbuehl.Suiza

O. Gisella Martínez Rodríguez, M. Sc.

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
Facultad de Geología, Geofísica y Minas
Centro para Minería Sostenible. Arequipa, Perú.

Publicado en 2021 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, Francia y la Oficina de la UNESCO en Montevideo, Luis Piera 1992, Edificio Mercosur, 2do piso, Montevideo 11200, Uruguay.

© UNESCO 2021



Esta publicación está disponible en acceso abierto bajo la licencia Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>). Al utilizar el contenido de la presente publicación, los usuarios aceptan las condiciones de utilización del Repositorio UNESCO de acceso abierto (www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-sp).

Los términos empleados en esta publicación y la presentación de los datos que en ella aparecen no implican toma alguna de posición de parte de la UNESCO en cuanto al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o regiones ni respecto de sus autoridades, fronteras o límites.

Las ideas y opiniones expresadas en esta obra son las de los autores y no reflejan necesariamente el punto de vista de la UNESCO ni comprometen a la Organización.

Las fotografías e ilustraciones utilizadas en esta obra, a menos que se indique lo contrario, son de los autores de los capítulos.

Este documento debe citarse como:

García-Chevesich, P., R. Pizarro, C. Lehmann y G. Martínez (Eds.). 2021. Estado actual de la gestión de sedimentos en nueve países de las Américas. United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization. Iniciativa Internacional de Sedimentos. Montevideo, Sede Regional. Documento Técnico #44. 130 p.

Editor de la Serie Técnica del PHI-LAC: Miguel de França Doria

Fotografía de cubierta: Roberto Pizarro

Diseño gráfico:

Diseño de cubierta:

Asistentes de edición: María Clara Cremona, Sabrina Cupeiro, Camila Tori

¿Hacia dónde van los materiales que transporta el agua?

El desprendimiento, transporte y almacenamiento de sedimentos, que son procesos resultantes de la erosión de suelos, afectan los ecosistemas fluviales y pueden transportar contaminantes con un importante impacto en diversas partes de las cuencas. A nivel de las Américas, si bien algunos territorios poseen instrumentos para controlar las emisiones, éstos no han dado amplios resultados positivos. Algunos países incluso no presentan normativas en el tema. Contar con medidas específicas permitirá reducir sustancialmente la pérdida anual de millones de hectáreas de suelo, con beneficios también a nivel de los recursos hídricos.

Esta publicación está dirigida principalmente a técnicos y tomadores de decisión; y hace un llamado al sector político de la región, a crear normas para una gestión adecuada de la erosión y sedimentos, siguiendo o adaptando las buenas prácticas verificadas.

Descubra cómo se están gestionando los sedimentos en nueve países de las Américas, con el propósito de brindar un análisis regional de este fenómeno natural, que también puede ser un problema antrópico.

En particular
Estados Unidos y
Uruguay tienen
desarrollos positivos
de la gestión
de sedimentos



«Dado que las guerras comienzan en la mente de los hombres y las mujeres, es en la mente de los hombres y las mujeres donde deben construirse las defensas de la paz»

Tabla de Contenidos

Agradecimientos	15
<i>In memoriam</i>	15
Prefacio	17
Reflexiones iniciales	19
Resumen ejecutivo	21
Capítulo 1. Perspectiva del estado de los sedimentos en Argentina	23
1.1. Introducción	23
1.2. Procesos erosivos en Argentina	23
1.3. Mediciones del transporte de sedimentos	26
1.4. Los sedimentos en los cauces	28
1.5. Marco normativo general sobre regulación del suelo y fenómenos de erosión	29
1.6. Conclusiones	32
1.7. Referencias bibliográficas	32
Capítulo 2. Perspectiva del estado de los sedimentos en Brasil	33
2.1. Introducción	33
2.2. Erosión de los suelos en Brasil	33
2.3. Sedimentación en Brasil.....	34
2.4. Consecuencias socioeconómicas de la erosión y sedimentación en Brasil.....	38
2.5. Medidas de control de erosión y de manejo de sedimentos en Brasil	39
2.6. Perspectivas futuras para el control de erosión y manejo de sedimentos en Brasil	40
2.7. Conclusiones	45
2.8. Referencias bibliográficas	45
Capítulo 3. Perspectivas del estado de los sedimentos en Chile	47
3.1. Introducción	47
3.2. Revisión bibliográfica.....	48
3.3. Políticas	52
3.4. El futuro de la investigación en torno a los sedimentos	53
3.5. Agradecimientos.....	54

3.6. Referencias bibliográficas	54
Capítulo 4. Perspectivas del estado de los sedimentos en Costa Rica.....	59
4.1. Introducción	59
4.2. Estimaciones realizadas.....	59
4.2.1. Zona norte	59
4.2.2. Zona central.....	61
4.3. Estudio de la cuenca tributaria al río San Juan.....	63
4.4. Conclusiones	64
4.5. Referencias bibliográficas	65
Capítulo 5. Perspectivas del estado de los sedimentos en Cuba.....	67
5.1. Introducción	67
5.2. Revisión bibliográfica.....	68
5.3. Métodos	69
5.3.1. Ecosonda	70
5.3.2. Estación total	70
5.4. Síntesis de resultados	70
5.5. Principales usos que se les dan a los sedimentos depositados en las represas.....	74
5.6. El futuro de la investigación en torno a los sedimentos	78
5.7. Agradecimientos.....	78
5.8. Referencias bibliográficas	79
Capítulo 6. Perspectivas del estado de los sedimentos en Estados Unidos	81
6.1. Introducción	81
6.2. Sistema legislativo relacionado con los sedimentos	82
6.3. Sistema de incentivos	84
6.4. Inventarios de sedimentos.....	85
6.5. Industria y tecnologías asociadas a los sedimentos	85
6.6. Agencias federales relacionadas con los sedimentos.....	86
6.7. Agencias estatales, de condados y locales relacionadas con los sedimentos	91
6.8. Conclusiones	94
6.9. Referencias bibliográficas	94
Capítulo 7. Perspectivas del estado de los sedimentos en México	97
7.1. Introducción	97
7.2. Antecedentes.....	97
7.3. Las presas en México.....	98

7.4. El azolvamiento de las presas.....	100
7.5. Políticas.....	102
7.6. El futuro de la investigación en torno a los sedimentos.....	102
7.7. Conclusiones.....	104
7.8. Referencias bibliográficas.....	105
Capítulo 8. Perspectivas del estado de los sedimentos en Perú.....	107
8.1. Introducción.....	107
8.2. Revisión bibliográfica.....	108
8.2.1. Estudio integral de los sedimentos suspendidos.....	108
8.2.2. Estimación de la erosión y deposición de sedimentos.....	110
8.2.3. Prácticas de manejo para el control de la erosión y sedimentación.....	111
8.2.4. Utilización de los sedimentos aguas abajo.....	113
8.3. Políticas.....	114
8.3.1. Reglamentos vigentes.....	115
8.4. Servicios ecosistémicos, cambio climático y el futuro de la investigación y políticas en torno a los sedimentos.....	116
8.5. Agradecimientos.....	116
8.6. Referencias bibliográficas.....	117
Capítulo 9. Perspectivas del estado de los sedimentos en Uruguay.....	121
9.1. Introducción.....	121
9.2. Erosión hídrica en Uruguay.....	121
9.2.1. Historia de la erosión en Uruguay.....	121
9.2.2. Conocimiento científico local como pilar de las políticas públicas.....	122
9.2.3. Política de conservación de suelos en Uruguay.....	123
9.2.4. Futuros trabajos en materia de erosión hídrica.....	124
9.3. Transporte y manejo de sedimentos en cursos de agua de Uruguay.....	124
9.3.1. Conocimiento científico local como pilar de las políticas públicas.....	125
9.3.2. Futuros trabajos en materia de transporte de sedimentos en cursos.....	126
9.4. Referencias bibliográficas.....	127
Conclusiones.....	129

Listado de Figuras

Figura 1-1.	Precipitación media anual períodos 1961-1990 y 1981-2010, y tendencias de cambio de la precipitación	24
Figura 1-2.	Temperatura media anual períodos 1961-1990 y 1981-2010, y tendencias de cambio de la temperatura media	24
Figura 1-3.	Erosión hídrica actual en la República Argentina continental	25
Figura 1-4.	Erosión hídrica en zonas agrícolas de la República Argentina	26
Figura 1-5.	Estaciones de aforo de la República Argentina de la Red Hidrometeorológica Nacional	27
Figura 1-6.	Embalses de la República Argentina (en verde: embalses construidos; en rojo: cierres en distintas etapas de estudio o construcción.)	27
Figura 1-7.	Dique Itiyuro – Detalle del vertedero con flujo cargado de sedimentos	28
Figura 1-8.	Bifurcación del río Pilcomayo en el “Pantalón”	29
Figura 1-9.	Evolución del frente del Delta del Paraná (INA, 2002-2004)	30
Figura 2-1.	Áreas donde $A > T$ en la cuenca del río Pipiripau (DF)	34
Figura 2-2.	Producción de sedimentos en Brasil	35
Figura 2-3.	Estaciones sedimentométricas en Brasil	36
Figura 2-4.	Turbidez promedio de las 2.058 estaciones de la Figura 2.3, en el 2014	36
Figura 2-5.	Valores de SDR calculados para la cuenca del río Pipiripau (DF), utilizando 8 ecuaciones distintas	37
Figura 2-6.	Relación entre el sedimento de arrastre (Q_a) y el sedimento en suspensión (Q_s) en el río Areias, Brasil.....	37
Figura 2-7.	Impacto económico de la erosión en Brasil	38
Figura 2-8.	Terrazas en nivel, en el Programa “Paraná Rural”	39
Figura 2-9.	Pérdidas de suelo bajo distintas prácticas del Programa “Paraná Rural”, en comparación con el sistema convencional	39
Figura 2-10.	Compuertas de la presa de Santo Antonio, al nivel del lecho	40
Figura 2-11.	Relación entre el costo del tratamiento de agua y el porcentaje de la cuenca bajo conservación en la provincia de Paraná, Brasil	41
Figura 2-12.	Beneficios generados en distintas cuencas brasileñas, después de la implantación del Programa ‘Productor de Agua’	42
Figura 2-13.	Cárcava en el Condominio Noroeste (Brasília-DF)	42
Figura 2-14.	Sección de una galería de aguas pluviales monitoreada	43
Figura 2-15.	Galerías pluviales en el Condominio Noroeste (Brasília-DF), con los puntos de monitoreo de Sc	44
Figura 3-1.	Desertificación, degradación de tierra y sequía en Chile	48
Figura 3-2.	Superficie de suelo con riesgo de erosión actual y potencial en Chile.....	51
Figura 3-3.	Resultados de las encuestas sobre el conocimiento de prácticas voluntarias y normas relacionadas con los sedimentos en Chile.....	53

Figura 4-1.	Cuencas de la zona norte	60
Figura 4-2.	Mapa de erosión potencial cuenca Peñas Blancas	61
Figura 4-3.	Ubicación de cuencas de estudio	62
Figura 4-4.	Mapa de erosión potencial cuenca Pirrís.....	63
Figura 4-5.	Factor R como función de la precipitación media anual	64
Figura 4-6.	Erosión potencial en el área de estudio.....	64
Figura 5-1.	Curvas típicas de Área VS Elevación del embalse Chalons, provincia Santiago de Cuba (106 años).....	69
Figura 5-2.	Localización de los embalses estudiados para determinar la sedimentación producida desde su construcción. Se encuentra en municipios y provincias.....	72
Figura 5-3.	Organopónico “El Polo”, localizado en las cercanías de la Ciudad Universitaria “José A. Echevarría” (CUJAE)	77
Figura 5-4.	Utilización de un cantero de cultivo para el experimento de la cebolla en el organopónico “El Polo”	77
Figura 6-1.	Evolución de las tasas de erosión en Estados Unidos, en base a factores regionales como clima, suelos, topografía y prácticas de cultivo	82
Figura 6-2.	Típico ejemplo de un inadecuado control de la erosión y los sedimentos en zonas áridas de Estados Unidos, en donde por norma se aplican técnicas que son efectivas solamente en climas más húmedos	83
Figura 6-3.	Evolución de la concentración de MP10 en 279 ciudades estadounidenses tras la creación de la normativa de control de sedimentos.....	84
Figura 6-4.	Evolución del presupuesto para cada año fiscal del “Environmental Quality Incentives Program”, en miles de millones de dólares	85
Figura 6-5.	La erosión eólica (en rojo) y la erosión hídrica (en azul) se han reducido significativamente debido a la implementación de mejores prácticas y de programas de incentivos en Texas, el oeste y el sureste de Estados Unidos.....	87
Figura 6-6.	Cuencas y proyectos piloto de la Iniciativa Nacional de Calidad del Agua NWQI	88
Figura 6-7.	Distribución administrativa de las 10 oficinas regionales de la EPA.....	92
Figura 7-1.	Cien principales presas de México	99
Figura 7-2.	Distribución de presas por entidad federativa	99
Figura 7-3.	Periodo de construcción de las principales presas de México	102
Figura 8-1.	Reforestación y estaquillados de madera para la recuperación de laderas en la región Selva	112
Figura 8-2.	Estabilización de ladera con Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i> L. Roberty) para la protección de infraestructura hidráulica en la región Costa.....	112
Figura 8-3.	Aplicación de mezcla de hidrosiembra en la región Andina	113
Figura 8-4.	Resultados de hidrosembrado en la región Andina	113
Figura 9-1.	Evolución del área de cultivos para granos	122
Figura 9-2.	Muestreador de fondo tipo US-BL84, utilizado por el IMFIA para el transporte por fondo de cursos fluviales	126
Figura 9-3.	Pasarela sobre el río Santa Lucía. Ejemplo de punto de monitoreo de transporte por fondo utilizando el muestreador US-BL84.....	127

Listado de Tablas

Tabla 2-1.	Variables sedimentológicas de dos presas brasileñas	38
Tabla 2-2.	Pagos por la reducción de erosión en el Programa Productor de Agua.....	41
Tabla 2-3.	Gradiente de las tuberías de agua pluvial del Cond. Noroeste, indicando en color rojo los puntos donde el criterio de Sc no fue alcanzado, y donde hay riesgo de deposición de sedimentos.....	45
Tabla 3-1.	Literatura científica más relevante relacionada con el estudio de los sedimentos en Chile	49
Tabla 4-1.	Estimaciones de erosión potencial en diferentes cuencas de estudio	61
Tabla 5-1.	Resultado de los estudios de sedimentación realizado en 18 embalses, localizados en 11 provincias	73
Tabla 5-2.	Parámetros morfométricos de los embalses objeto de estudio años 2006-2014 localizados en 11 provincias	73
Tabla 5-3.	Resultado de la Granulometría del sedimento	75
Tabla 5-4.	Rendimientos en kg.m-2 en los cultivos estudiados en la primera fase	76
Tabla 5-5.	Rendimientos en kg.m-2 en los cultivos estudiados en la segunda fase	76
Tabla 5-6.	Rendimientos en kg.m-2 en los cultivos estudiados en el organopónico	77
Tabla 5-7.	Algunas preguntas y respuestas asociadas a los sedimentos y aplicadas a la realidad cubana.....	78
Tabla 7-1.	Tasa de sedimentación en algunas presas mexicanas	100
Tabla 7-2.	Cambio porcentual Uso de suelo y Vegetación Series I a la VI de INEGI.....	101

Listado de Siglas

ACTAF	Asociación Cubana de Técnicos Agrícolas y Forestales
ANA	Agencia Nacional de Aguas - Brasil
BLM	Oficina de Administración de Tierras de Estados Unidos
BMP	Mejores Prácticas de Gestión
BPM	Buenas Prácticas de Manufactura
CAA	Lay de Aire Limpio
CC	Cultivos Continuos
CCyC	Código Civil y Comercial de la República Argentina
CENHICA	Centro de Hidrología y Calidad de Las Aguas - Cuba
CIREN	Centro de Información de Recursos Naturales - Chile
CNULD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación
CONAF	Corporación Nacional Forestal - Chile
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua - México
CONCYTEC	Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica - Perú
CRP	Programa de Reserva de Conservación - Estados Unidos
CSP	Programa de Manejo en Conservación - Estados Unidos
CTHA	Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental - Chile
CUJAE	Ciudad Universitaria "José A. Echevarría" - Cuba
CWA	Ley de Agua Limpia
DF	Distrito Federal
DGMN	Dirección de Gestión del Medio Natural - Chile
DIEA	Dirección de Estadísticas Agropecuarias - Uruguay
DINAGUA	Dirección Nacional de Aguas - Uruguay
DNH	Dirección Nacional de Hidrografía - Uruguay
EENE	Eventos de El Niño Extremo
EIPHH	Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana - Cuba
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
EPG	Escuela de Posgrado (UNALM-Perú)
EQIP	Programa de Incentivos a la Calidad Ambiental - Estados Unidos
EWP	Programa de Protección de Cuencas de Emergencia - Estados Unidos
FAGRO	Facultad de Agronomía de la Universidad de la República - Uruguay
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FIA	Programa de Inventario y Análisis Forestal - Estados Unidos
GESC	Programa de Control de Grados, Erosión y Sedimentos - Estados Unidos

GIS	Sistema de Información Geográficos
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
GRP	Programa de Reserva de Pastizales - Estados Unidos
IAHR	Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas
IDR	Instituto de Investigación para el Desarrollo - Perú
IECA	Asociación Internacional de Control de la Erosión
IGN	Instituto Geográfico Nacional - Argentina
IGP	Instituto Geofísico del Perú
IMFIA	Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - Uruguay
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INA	Instituto Nacional del Agua - Argentina
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información - México
INIA	Instituto de Investigaciones Agropecuarias - Chile
INIA	Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - Uruguay
INIFAT	Instituto de Investigaciones Fundamentales de la agricultura Tropical - Cuba
INPA	Instituto Nacional de Investigaciones de la Amazonía de Brasil
INRENA	Instituto Nacional de Recursos Naturales - Perú
INRH	Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos - Cuba
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Argentina
IRD	Instituto francés de Investigación para el Desarrollo
ISI	Iniciativa Internacional de Sedimentos
ITPS	Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (FAO)
JET	ensayos de erosión por chorro
LCD	Representación visual por cristal líquido
USB	Periférico que permite conectar diferentes periféricos a una computadora
LAC	América Latina y el Caribe
LED	Diodo emisor de luz
LEED	Certificación en Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental
MGAP	Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca - Uruguay
MINAG	Instituto de Suelos, Ministerio de la Agricultura - Cuba
MRSE	Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos - Perú
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas - Uruguay
MUSLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada
MVOTMA	Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente - Uruguay
NAAQS	Normas Nacionales de Calidad del Aire - Estados Unidos
NAMINO	Nivel de Aguas Mínimas de Operación
NAMO	Nivel Máximo de Agua Ordinario
NCSS	Cooperativa Nacional de Inventarios de Suelos - Estados Unidos

NEPA	Ley de Política Ambiental Nacional - Estados Unidos
NHPA	Ley de Preservación Histórica Nacional - Estados Unidos
NOI	Notificación de Intención
NPDES	Sistema Nacional de Eliminación de Descargas de Contaminantes - Estados Unidos
NPS	Servicio de Parques Nacionales - Estados Unidos
NRCS	Servicio de Conservación de Recursos Naturales - Estados Unidos
NRST	Equipo Nacional de Servicios Ribereños - Estados Unidos
NWIS	Sistema Nacional de Información de Agua - Estados Unidos
NWQI	Iniciativa Nacional de Calidad del Agua - Estados Unidos
NMFS	Servicio Nacional de Pesca Marítima - Estados Unidos
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez
PCB	Bifenilos Policlorados
RCP	Rotación de Cultivos y Pasturas
PHI	Programa Hidrológico Intergubernamental (UNESCO)
PLANAGERD	Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - Perú
PM10	Material Particulado de 10 micrones o menos de diámetro
PSA	Pago por Servicio Ambiental - Brasil
PUCP	Pontificia Universidad Católica del Perú
PUMS	Plan de Uso y Manejo del Suelo
RHA	Regiones Hidrológico-Administrativas - México
RUSLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SAG	Servicio Agrícola y Ganadero - Chile
SALT	Equipo Multiagencia de Liderazgo en Acústica de Sedimentos
SCS	Servicio de Conservación de Suelos - Estados Unidos
SDEQ	Departamento Estatal de Calidad Ambiental - Estados Unidos
SDR	Relación de aporte de sedimentos
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - Perú
SIPH	Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica - Argentina
SMN	Servicio Meteorológico Nacional - Argentina
SUNASS	Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento - Perú
SWPPP	Plan de Prevención de Contaminación de Aguas Pluviales - Estados Unidos
SWQS	Normas de Calidad del Agua Superficial - Estados Unidos
TANDAR	Acelerador Tandem Argentino
TCEQ	Comisión de Calidad Ambiental de Texas - Estados Unidos
TMDL	Total de Cargas Diarias Máximas
TWBD	Junta de Desarrollo de Agua de Texas - Estados Unidos
UDELAR	Universidad de la República Uruguay

UNALM	Universidad Nacional Agraria La Molina - Perú
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UNMSM	Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Perú
USACE	Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos
USDA	Departamento de Agricultura de Estados Unidos
USFS	Servicio Forestal de Estados Unidos
USFWS	Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos
USGS	Servicio Geológico de Estados Unidos
USLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo
UTM	Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator
WEPP	Modelo de Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica

Agradecimientos

La Iniciativa Internacional de Sedimentos (ISI), del Programa Hidrológico Intergubernamental de UNESCO para la región de América Latina y el Caribe, agradece profundamente la valiosa colaboración de todos los autores de cada país, quienes se esforzaron voluntariamente para la elaboración de sus respectivos capítulos.

In memoriam

Prof. Carlos Llerena

El profesor Carlos Llerena fue un reconocido Ingeniero Forestal, graduado en el año 1979 de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM, Perú). En el año 1987 obtuvo su grado de Maestría en Ciencias Forestales (Universidad de Alberta, Canadá) y desarrolló durante más de 30 años un arduo trabajo y dedicación en el área educativa y de investigación, con numerosas publicaciones de su especialidad. El Ingeniero Llerena dictó cursos en distintas partes del mundo, incluyendo Perú, Kenia, España, Estados Unidos y Japón, entre otros. Además, fue miembro del Comité Científico Internacional del Proyecto LBA (Experimento a Gran Escala en la Biosfera Atmósfera de la Amazonia), Docente Principal en la UNALM y Decano de su entrañable Facultad de Ingeniería Forestal, entre otros importantes cargos. Sus esfuerzos se enfocaron en el manejo de cuencas, hidrología y manejo forestal, incluyendo la conservación de suelos.



Con mucho honor, los editores y autores dedican esta importante publicación al profesor Llerena, en memoria de su inmensa contribución al manejo de cuencas y la conservación de suelos en el Perú y otros países de la región.

Prefacio

Los sedimentos fluviales y lagunares, son visibles y notorios. Sin embargo, sigue siendo complejo en que su impacto sea más evidente. Su presencia afecta de diversas maneras en los ecosistemas y las sociedades, teniendo también efectos diversos en la economía. Si bien la erosión es un fenómeno natural, se ve propiciado por las acciones antrópicas, que influyen en el uso de suelos y las condiciones naturales, pudiendo provocar situaciones extremas como incendios y forestación. Como consecuencia, la capacidad de las sociedades para producir alimentos se ve afectada por la erosión de los suelos, lo que impacta directamente en los esfuerzos para lograr el fin de la pobreza (ODS 1) y el hambre cero (ODS 2).

Algunas de las formas en las que los sedimentos interfieren con la estructura, involucran por ejemplo, la capacidad de generar energía de forma eficiente, debido a que la sedimentación acumulada en represas puede reducir la vida útil de embalses hidroeléctricos. En el caso de las presas de contención, se afecta la cantidad de agua disponible para provisión de agua potable, para riego o recreación. Los sedimentos también juegan un rol importante en el transporte de microorganismos al aumentar la superficie de adsorción disponible para que los mismos puedan adherirse y reproducirse, trasladándolos de un ambiente a otro. El impacto en las zonas costeras es mayor, ya que en estas zonas disminuye la velocidad del agua, sedimentándose las partículas junto a los microorganismos adheridos y modificando la composición original de las costas.

La gestión de los sedimentos cobra entonces un papel importante para el logro de la protección del planeta y aseguramiento de la prosperidad de todos, ambas metas de la Agenda 2030 que atraviesan a varios de sus objetivos, por lo que su estudio no debería ser limitado únicamente a ciertas áreas de la ciencia. Tanto la generación de datos, como su análisis e implementación de medidas requiere de una gestión colaborativa entre distintos organismos gubernamentales y no gubernamentales, centros de investigación, agencias, instituciones privadas e industria.

Esta publicación presenta los esfuerzos de países de la región para monitorear los procesos erosivos, mitigar sus efectos, contar con regulaciones y normativas adecuadas y brindar usos productivos a los sedimentos generados. Todos ellos recalcan la importancia de la investigación en esta temática, a fin de aumentar el conocimiento tanto del proceso como de las medidas que permitan gestionar de manera adecuada los sedimentos, en función a las características de cada país.

Abou AMANI
Secretario, Programa Hidrológico Internacional (PHI)
Director de la División de Ciencias del Agua UNESCO

Reflexiones iniciales

La producción, transporte y depositación de sedimentos son procesos naturales que dan forma a la Tierra. En la mayoría de los casos, estos procesos pasan inadvertidos para la percepción humana, ya que a menudo son procesos continuos y de largo plazo que solo pueden ser evidenciados mediante una observación atenta. Sin embargo, cuando los procesos relacionados con los sedimentos entran en conflicto espacial con las actividades humanas y los ecosistemas, a menudo pueden traer graves consecuencias. Cada año mueren personas en todo el mundo como resultado de la erosión, deslizamientos e inundaciones con alta carga de sedimentos. Los impactos negativos de la erosión y sedimentación se ven agravados adicionalmente por un crecimiento poblacional sostenido por la dispersión de actividades en zonas de riesgo.

En la actualidad, los efectos del cambio climático involucran impactos negativos relacionados con la emisión de sedimentos, la cual aumentará en la mayoría de los casos. La pérdida de regiones de permafrost en las montañas aumenta el riesgo de deslizamientos de tierra, lo que significa que en el futuro habrá más sedimentos disponibles para su remoción. También, precipitaciones más intensas pueden provocar un aumento de la erosión del suelo en algunas regiones y, del mismo modo, las sequías se traducen en menos cobertura vegetal y protección del suelo superficial, por citar solo tres ejemplos. Además del transporte de sedimentos de los ríos, la erosión del suelo y la sedimentación en embalses son problemas importantes en América Latina, el Caribe y en Estados Unidos, como demuestran las siguientes contribuciones.

La erosión del suelo es un factor importante que afecta directamente la producción agrícola. La pérdida de suelo conduce a una reducción de los rendimientos agrícolas, lo que en casos extremos puede provocar problemas de suministro en determinadas regiones y, en consecuencia, tensiones sociales. Las consecuencias negativas de este importante proceso, como la reducción de la fertilidad del suelo, el desarraigo de los cultivos o el lavado de las semillas, están causando cada vez más daños económicos a nivel global. Los sedimentos también colapsan los canales de riego, que pierden su capacidad de flujo con el tiempo. Por lo tanto, el riego pierde eficiencia, lo que puede resultar en un menor rendimiento agrícola. Además, la erosión del suelo también puede provocar graves daños ecológicos si los metales pesados, los plaguicidas y otros contaminantes, entran en contacto con el agua de ríos, lagos y océanos, contaminándolos progresivamente.

La sedimentación de los embalses también es un tema importante en muchas partes del mundo, incluyendo América Latina y El Caribe. Los embalses creados con el uso de grandes recursos financieros pierden cada año en volumen de almacenamiento, disminuyendo su vida útil y, como consecuencia, muchos embalses tienen solo unos pocos años de vida por delante, lo que se traduce en grandes inversiones en el mediano plazo. En casos extremos, habrá que construir nuevos embalses para satisfacer la creciente demanda de electricidad o de sistemas de riego, por ejemplo.

Aunque se conocen diversos métodos en todo el mundo y se vienen realizando grandes esfuerzos para llevar a cabo observaciones de sedimentos, todavía existen grandes lagunas en nuestros conocimientos. Los conocimientos generales o los métodos existentes de estimación o cálculo a menudo solo pueden transferirse a situaciones regionales en una medida limitada. Por ejemplo, la aplicación de fórmulas o métodos no específicos de una región debe llevarse a cabo con grandes restricciones porque no se tienen suficientemente en cuenta las características regionales o de una cuenca. Además, la transferibilidad de los resultados obtenidos de una determinada área a otras no es generalmente posible en absoluto o solo con grandes limitaciones, debido a que cada región y cada cuenca tiene sus propias características específicas en cuanto a geología, topografía, estructura del suelo y uso de la tierra. A menudo se necesitan datos donde no se dispone de estaciones de medición correspondientes, y deben utilizarse métodos o fórmulas para obtener esta información. Por lo tanto, es importante mejorar y consolidar las redes de medición y observación existentes para obtener datos más fiables en el futuro.

Además, la transferencia de conocimientos es de gran valor. No solo es relevante la transferencia de conocimientos entre países y regiones individuales, sino también la transferencia de conocimientos de la ciencia a los usuarios. Por lo tanto, es importante no solo intercambiar resultados y experiencias entre los científicos, sino también transmitirlos regularmente a los ingenieros, geólogos, silvicultores, políticos, etc., que trabajan a nivel de base.

En este sentido, UNESCO ya ha realizado un trabajo muy valioso con su Programa ISI (Iniciativa Internacional de Sedimentos o "International Sediment Initiative"). A intervalos regulares, los científicos y expertos pueden intercambiar ideas a nivel internacional y local en seminarios regionales.

Además, publicaciones como la presente son muy importantes. Expertos de renombre de América Latina, el Caribe y de Estados Unidos han escrito artículos para este libro. Los artículos representan el estado actual del conocimiento sobre los diversos aspectos de los problemas y de la gestión de sedimentos en ocho países de América Latina, el Caribe y en Estados Unidos, con una ponderación especial a problemas relacionados con la erosión del suelo y la sedimentación de embalses, así como del transporte de sedimentos en los ríos y cuerpos de agua. A futuro será necesario encontrar soluciones a estos problemas, tanto en términos de metodología como de captación, elaboración y procesamiento de datos.

La cuestión de las consecuencias del cambio climático es una fuente de gran incertidumbre. A este respecto, se plantean retos cada vez mayores que solo pueden resolverse de manera eficaz mediante la participación conjunta de todas las fuerzas y con la superación de las fronteras regionales y nacionales.

Dr. Christoph Lehmann
Hydrologie – Wasserbau
CH-3322 Urtenen-Schönbühl
Suiza
hydrologie@solnet.ch

Resumen ejecutivo

La problemática de los sedimentos es poco conocida por la población global y también por los tomadores de decisiones. Ello se demuestra en que no existe mayor conciencia acerca de la importancia de los procesos de erosión y los sedimentos, y sus impactos sobre el ambiente físico y humano. De igual manera, no se percibe la importancia de promover el intercambio de información relativa a la erosión y los sedimentos, en el contexto de información relevante, como tampoco se percibe la necesidad de monitorear esta problemática.

En el marco descrito, el fenómeno de la erosión representa una menor fertilidad de los suelos y una reducción de sus capacidades productivas. Dicho proceso se relaciona directamente con otro, la sedimentación, que reduce la capacidad de conducción de agua de los canales de regadío; afecta la calidad de las aguas por la mayor turbidez; involucra un cambio de las características de los ecosistemas acuáticos; modifica el cauce de los ríos generando una menor capacidad de conducción de las crecidas, aumentando con ello la posibilidad de inundaciones con riesgo de pérdida de vidas humanas; e incrementa la posibilidad de descalce de las cepas de puentes y de los cimientos de obras civiles de alto costo, entre otros aspectos. Todo esto lo define como un problema mayor, que debe ser abordado desde una perspectiva nacional y regional, con fines de resolución integral ya que afecta a muchas personas y a varios sectores productivos.

El presente libro es una revisión del estado actual de la gestión de los sedimentos en ocho países de América Latina, El Caribe y Estados Unidos. Se instruyó a los autores a que elaborasen capítulos cortos, de alrededor de 10 páginas o menos de extensión, sin considerar la sección de referencias bibliográficas, tablas e imágenes, enfocándose en la realidad de la gestión de sedimentos de cada país, y poniendo énfasis en los principales problemas y logros en el tema.

Los capítulos fueron recibidos y revisados por los editores de esta publicación. Sin embargo, solo se realizaron cambios de redacción y formato. Pese a que las temáticas abordadas en cada capítulo eran distintas, se deben recalcar las importantes contribuciones recibidas en todos los casos. Además, se incluyó un capítulo sobre el estado actual de la gestión de sedimentos en Estados Unidos, país que lidera el tema a nivel mundial y que sirve como ejemplo para países de la región LAC.

Es importante señalar que, a pesar de no haber sido la orientación de este trabajo, se consideró la importancia del enfoque de género, dado que la gestión de los sedimentos tiene un impacto importante en la reducción de las desigualdades, la vida de los ecosistemas y el desarrollo sostenible. Futuros estudios podrán profundizar en estas relaciones.

Perspectivas del estado de los sedimentos en Argentina

Pablo D. Spalletti¹ (pspalletti@ina.gob.ar)

1.1. Introducción

La caracterización de los procesos asociados a los sedimentos implica analizar tanto los procesos de generación en las cuencas de aporte, como el transporte del material sólido por los ríos y cursos menores.

Los sedimentos que se movilizan a partir de los diferentes procesos naturales o antrópicos son en general tratados bajo distintas ópticas de acuerdo con la problemática particular que se enfrente, o a la disciplina técnica de quienes estén analizando los procesos. Así, por ejemplo, desde el punto de vista agronómico se suele hacer referencia a la pérdida de suelo y su impacto en los procesos productivos; desde las ciencias naturales, a la degradación ambiental y desde la geomorfología e ingeniería hidráulica, a la generación de sedimentos como aporte a los sistemas de drenaje.

Estos sedimentos, movilizadas desde su posición original, son transportados por torrentes, arroyos y ríos, condicionando los procesos morfológicos asociados a los fenómenos de sedimentación y erosión de cauces.

La evaluación regional de procesos con tantas facetas requiere una visión holística, que es imposible desarrollar en un texto breve. Por ello, se ha procedido a presentar una descripción general de la problemática de los sedimentos en Argentina, que pueda constituir un puente a las distintas disciplinas del conocimiento, para que su tratamiento se efectúe con una visión integral.

1.2. Procesos erosivos en Argentina

Los procesos erosivos son el resultado de la interacción de factores tales como topografía, clima, tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, características geológicas, geomorfología, etc.

La variabilidad geográfica de estos parámetros y sus características extremas en el territorio argentino son las causales de la presencia de regiones muy productoras de sedimentos, así como de extensas áreas susceptibles a la pérdida de suelo en las zonas de mayor producción agropecuaria.

Entre los factores más influyentes en los procesos erosivos deben destacarse el relieve y el clima, que junto a las características de los suelos condicionan la cobertura vegetal.

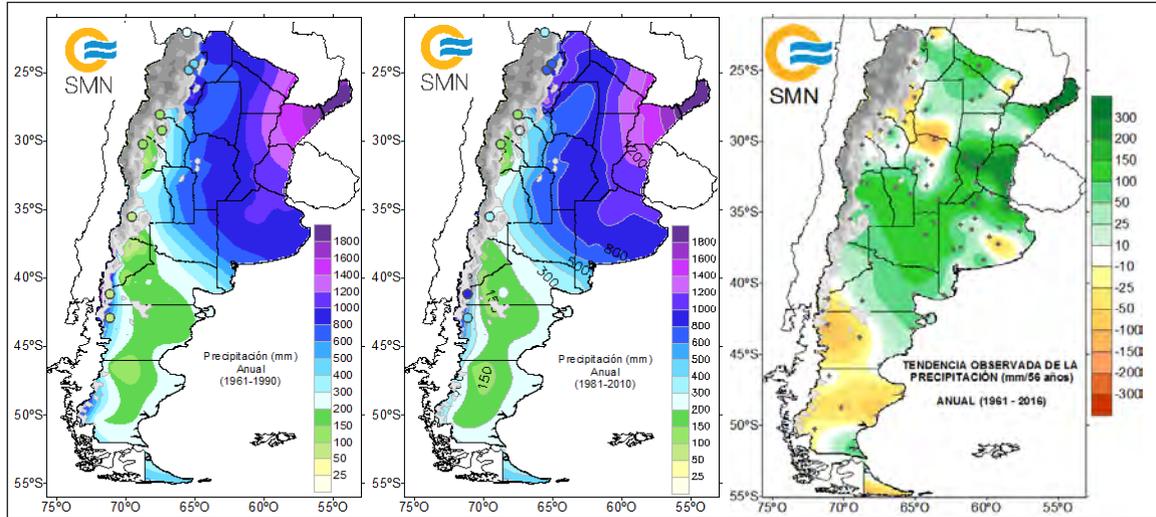
En relación con la precipitación, principal desencadenante de la erosión hídrica, en el país su distribución es muy diversa, tanto espacial como temporalmente. Las lluvias medias anuales en algunos sectores son prácticamente nulas, y en otros llegan a 2.000 mm (Figura 1-1), pero hay regiones donde las mismas se desarrollan en forma relativamente homogénea a lo largo del año, mientras que en otras zonas se concentran en pocos meses, o aún, en pocos eventos. Otro factor de interés es la presencia de extensas áreas donde la precipitación nival constituye gran parte de los aportes.

La extensión del territorio argentino, que abarca diversas latitudes, motiva junto a los efectos orográficos, una gran variabilidad de temperaturas como puede apreciarse en la Figura 1-2, donde se presenta la distribución de la temperatura media anual. Si bien este parámetro no suele incluirse

¹ Instituto Nacional del Agua, Argentina.

en las estimaciones de la producción de sedimentos en forma directa, es relevante en el desarrollo de la cobertura vegetal y en el uso del suelo.

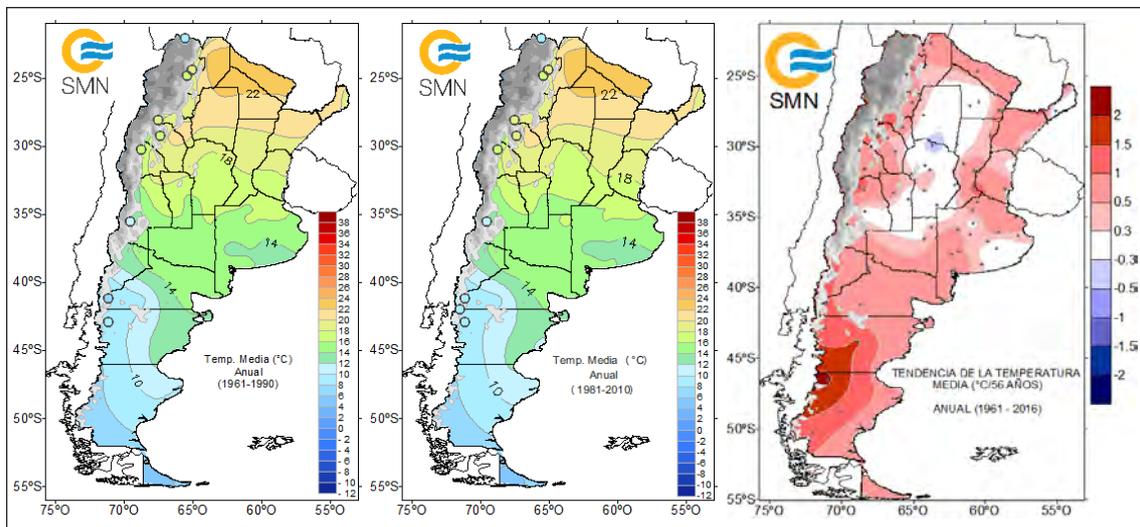
Figura 1-1. Precipitación media anual períodos 1961-1990 y 1981-2010, y tendencias de cambio de la precipitación



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional – Argentina.

Figura 1-2. Temperatura media anual períodos 1961-1990 y 1981-2010, y tendencias de cambio de la temperatura media



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional – Argentina.

Sobre la base de la información de los principales parámetros que condicionan los procesos de producción de sedimentos y pérdida de suelo, con su variación geográfica, diversos investigadores han desarrollado mapas esquemáticos con la distribución de los principales procesos geológicos en Argentina (González y Bejerman, 2004), donde se identifican las zonas que presentan erosión superficial y las que son susceptibles a desarrollar procesos de remoción en masa.

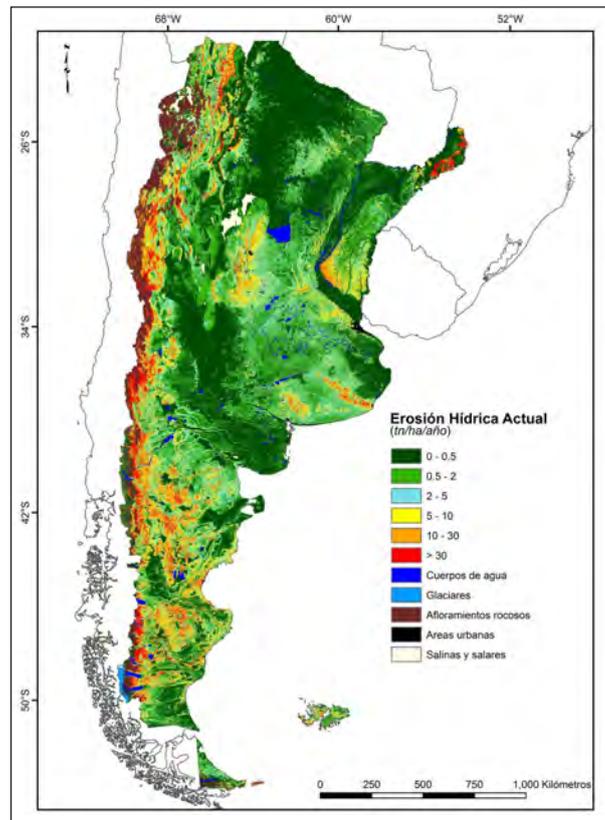
Otros investigadores han realizado análisis cuantitativos utilizando formulaciones para la estimación de los procesos de pérdida de suelo.

Durante las últimas décadas un gran número de metodologías han sido propuestas para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica y la producción de sedimentos asociada a ésta, variando considerablemente en sus objetivos, escalas espacio-temporales, como así también, en los conceptos en los que se basan.

En estudios regionales, por su simplicidad, suelen emplearse modelos empíricos y paramétricos como el de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por su sigla en inglés) (Wischmeier *et. al.* 1978), que considera en el análisis del proceso erosivo la interacción de factores naturales (lluvia, suelo y topografía) y de factores antrópicos (uso y manejo del suelo).

En la Figura 1-3 se presentan los resultados obtenidos en el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (INTA), de la aplicación de la USLE en todo el territorio nacional.

Figura 1-3. Erosión hídrica actual en la República Argentina continental



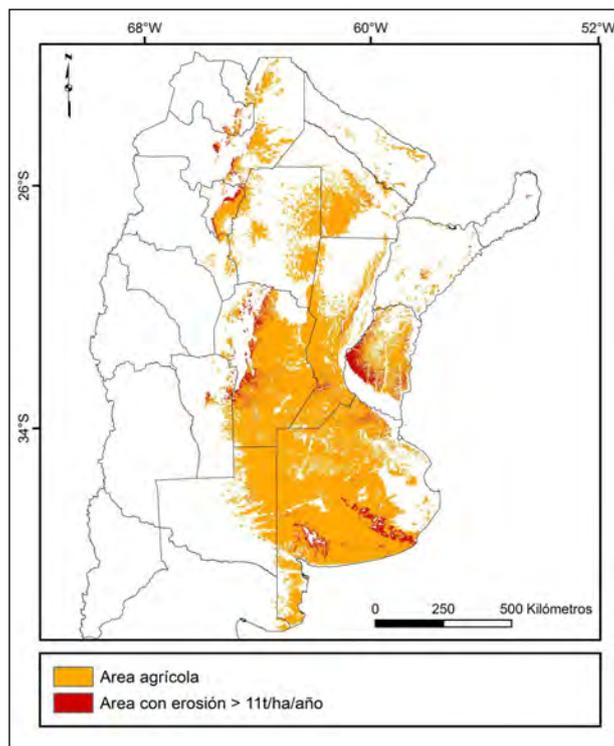
Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: INTA, 2017.

Estos análisis, más allá de las limitaciones de las formulaciones empleadas, dan valores de referencia de pérdida de suelo y, sobre todo, muestran la distribución y variabilidad de los procesos en todo el territorio nacional.

Por su origen y su extenso uso en la determinación de la pérdida de suelos en zonas agrícolas, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo es una interesante herramienta para caracterizar la erosión hídrica actual y potencial de los suelos en las zonas agrícolas de la República Argentina. Los resultados del estudio del INTA en estas regiones productivas se presentan en la Figura 1-4.

Figura 1-4. Erosión hídrica en zonas agrícolas de la República Argentina



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.
Fuente: INTA, 2017.

La cantidad de sedimentos entregados por una cuenca hidrológica de aporte a una sección en la unidad de tiempo define la producción de sedimentos. En su determinación debe tenerse en cuenta que no toda la pérdida de suelo que ocurre en la cuenca alcanza la red de drenaje.

Al igual que en el caso de la erosión hídrica, la erosión eólica puede ser natural, o acelerada cuando es propiciada por acciones antrópicas que cambian o influyen en el uso del suelo.

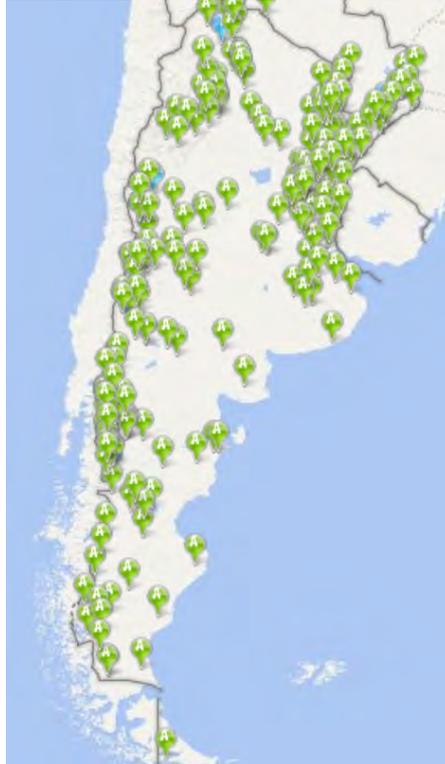
Este tipo de degradación del suelo es muy sensible al grado de cobertura vegetal, y la República Argentina posee aproximadamente dos terceras partes de su superficie bajo condiciones de aridez y semiaridez. De acuerdo con diversos estudios (Casas y Albarracín, 2015; Colazo *et al.*, 2008), la superficie nacional afectada por erosión eólica intensa es de alrededor de 45 millones de hectáreas. Las mayores tasas de erosión eólica se presentan en la Patagonia, en el sur del país, y en la región noroeste de la República, mientras que en la zona centro-oeste las tasas son moderadas a altas.

1.3. Mediciones del transporte de sedimentos

La Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica (SIPH) es el Organismo Nacional que se encarga del registro de niveles, caudales líquidos y sólidos en las estaciones de aforo distribuidas en el país. La Red Hidrológica Nacional cuenta con 326 estaciones, y en 61 de ellas se miden concentraciones de sedimentos.

La Figura 1-5 muestra la disposición de las secciones de aforo y las estaciones en que se dispone de información en el territorio nacional, cuyos registros están disponibles en la base de datos hidrológica de la SIPH.

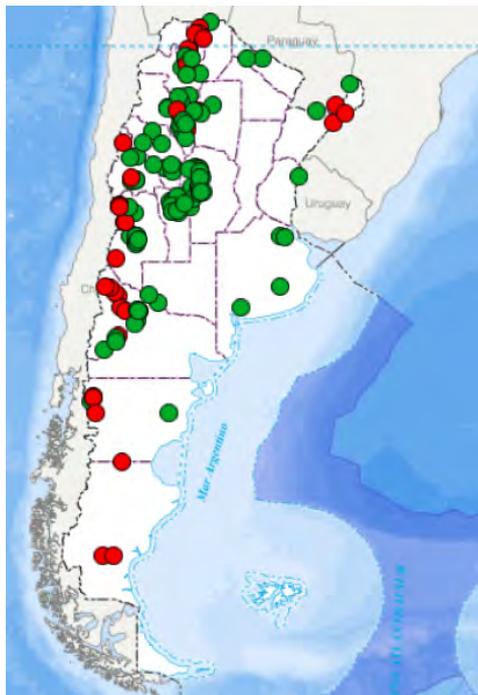
Figura 1-5. Estaciones de aforo de la República Argentina de la Red Hidrometeorológica Nacional



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Base de Datos Hidrológica Integrada, Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica. <https://www.argentina.gob.ar/secretaria-de-infraestructura-y-politica-hidrica/base-de-datos-hidrologica-integrada>)

Figura 1-6. Embalses de la República Argentina (en verde: embalses construidos; en rojo: cierres en distintas etapas de estudio o construcción)



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: <https://www.ina.gob.ar/lha/hfluvial/catalogo/web/index.html>

Otra fuente de información respecto de la producción y transporte de sedimentos la constituyen los relevamientos periódicos de batimetrías de embalses. Estos datos suelen encontrarse dispersos, lo que ha motivado un proyecto del Instituto Nacional del Agua (INA) que se encuentra en ejecución, para la recopilación, análisis y sistematización de la información.

Para ello se identificaron los embalses originados por grandes presas, es decir, aquellas con una altura igual o mayor a 15 metros entre su fundación y su cresta, o aquellas cuya altura sea de entre 5 y 15 metros y cuyo volumen embalsado sea mayor a 3 Hm³. En la Figura 1-6 se han indicado en verde los embalses construidos y en etapa de explotación, y en rojo, los cierres que se encuentran en distintas etapas de estudio o construcción.

Debido a las altas tasas de producción de sedimentos en ciertas regiones del país, se tienen embalses con serios problemas de colmatación. Un caso característico es el del embalse Itiyuro en el extremo norte de Argentina (Figura 1-7).

1.4. Los sedimentos en los cauces

Los sedimentos que se generan en la cuenca de aporte por erosión hídrica son arrastrados por el escurrimiento superficial, ya sea como flujo en manto o en surcos hasta los cauces mayores, donde el material puede ser movilizado en forma parcial o total, y transportado por el escurrimiento como arrastre de fondo o en suspensión.

Las altas tasas de producción de sedimentos en ciertas regiones del país son causales para que numerosos ríos presenten muy altas concentraciones de sólidos en suspensión. Como casos emblemáticos merecen citarse los ríos Pilcomayo y Bermejo, que forman parte de la Cuenca del Río de la Plata, y cuyas Cuencas Altas se localizan en el noroeste de Argentina y sur de Bolivia.

Figura 1-7. Dique Itiyuro – Detalle del vertedero con flujo cargado de sedimentos



Fuente: Fotografía de Ing. Marcos Pittau.

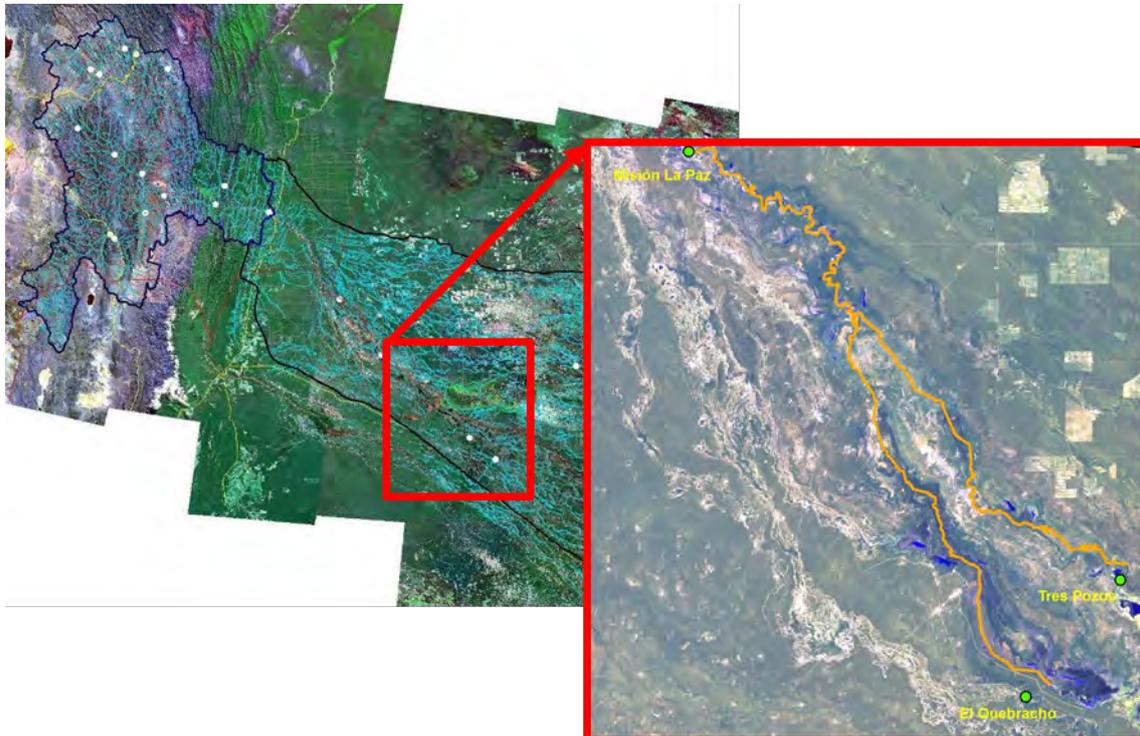
La Cuenca Alta del río Pilcomayo es de 80.000 km² y la tasa de transporte de sedimento anual a su salida es de 150.000.000 t/año, mientras que la superficie de la Cuenca Alta del río Bermejo es de 50.000 km² con un transporte de sedimento anual a su salida de 100.000.000 t/año. En condiciones de crecida las concentraciones de material suspendido son del orden de 30 g/l en el Pilcomayo y de 15 g/l en el Bermejo (Spalletti *et. al.* 2016), siendo el material transportado en suspensión entre el 80 y 90% del total.

La muy elevada tasa de transporte de sedimentos condiciona los procesos morfológicos en los tramos inferiores de los citados ríos, y en los cauces de los que son afluentes.

El caso extremo es el del río Pilcomayo, ya que durante las crecidas el flujo líquido no puede transportar la totalidad de sedimentos, produciéndose el taponamiento del río y el retroceso progresivo del extremo de aguas abajo del cauce principal, lejos de su antigua desembocadura en el río Paraguay, afluente del Paraná. Para dar continuidad al recurso hídrico y para el empleo del agua del río en la producción y en el mantenimiento de ciertos servicios ecosistémicos, Argentina y Paraguay han realizado canales en sus respectivos países, que también presentan graves problemas de sedimentación. La Figura 1-8 muestra la bifurcación del río Pilcomayo hacia ambos países, a la que suele hacerse referencia como “pantalón”.

El río Bermejo, con sus altas tasas de material en suspensión, transporta sedimentos hasta el río Paraguay y, por medio de este, al Paraná, siendo el principal aportante de material sólido a este último. En su extremo de aguas abajo, el río Paraná es el mayor afluente del río de la Plata y desarrolla un delta de aproximadamente 400 km de largo y 60 km de ancho que crece con los aportes del río Bermejo y, por supuesto, con los sedimentos producidos en cuencas del noroeste de Argentina y sur de Bolivia. La Figura 1-9 muestra la evolución del frente del Delta del Paraná durante los últimos 200 años (INA, 2002-2004).

Figura 1-8. Bifurcación del río Pilcomayo en el “Pantalón”



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Elaboración propia utilizando como información de base imágenes Landsat.

1.5. Marco normativo general sobre regulación del suelo y fenómenos de erosión

La descripción regional de los procesos de generación y transporte de sedimentos con una visión que integre las distintas disciplinas del conocimiento requiere también contemplar el marco normativo.

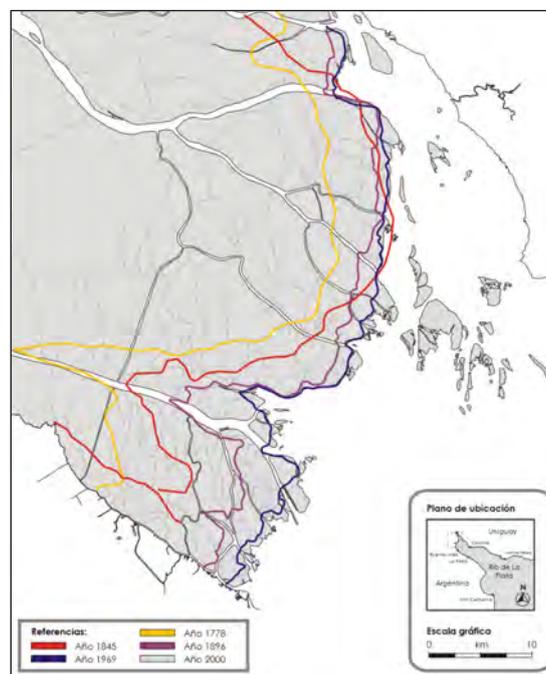
Para ello, se resumen los principales conceptos de las normativas jurídicas en Argentina sobre regulación del uso del suelo y su conservación, procesos de erosión, y otros fenómenos relacionados a los sedimentos, tomados de antecedentes donde las normas están ordenadas según la pirámide de jerarquía nacional y provincial (Davico *et al.*, 2018).

Respecto del ordenamiento jurídico Nacional, las principales normas relacionadas con la temática de los sedimentos ordenadas por jerarquía y en orden cronológico, son:

- **Código Civil y Comercial de la República Argentina (CCyC).** El CCyC, en vigencia desde el año 2015 y en reemplazo del antiguo Código Civil, es quien recoge las leyes que afectan a las personas, bienes, modos de propiedad, obligaciones y contratos.

Contempla varios artículos referidos a los recursos hídricos para determinar ciertas cuestiones de la propiedad de las cosas inmuebles, vinculándolos a episodios que tienen por causa un hecho de la naturaleza o la obra del hombre. Considera que la adhesión natural de suelos puede ser por avulsión o aluvión cuando no se deben a la intervención antrópica, y que la adhesión artificial puede ser consecuencia de la construcción, siembra y plantación.

Figura 1-9. Evolución del frente del Delta del Paraná (INA, 2002-2004)



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Instituto Nacional del Agua (INA) (2002-2004). Proyecto PICT 9351.

El CCyC también regula la línea de ribera, que fija el límite de lo que es de todos (dominio hídrico público, río, lago, etc.) y otras propiedades (públicas o privadas). Su fijación es una facultad provincial.

- **Ley N.º 22.428 “Fomento a la Conservación de los suelos” de 1981:**

Esta norma sancionada en el año 1981, reglamentada por Decreto N.º 681 del mismo año, estableció el régimen legal para el fomento de la acción privada y pública tendiente a la conservación y recuperación de la capacidad productiva de los suelos.

Entre sus objetivos se destaca la promoción de la educación y difusión para concientizar a la población y a los productores rurales en particular, acerca de la gravedad que reviste el problema de la degradación de los suelos, como así también, la estimulación a nivel nacional y provincial de medidas de fomento financiero, crediticio y tecnológico para estimular a los productores a desarrollar una acción conservacionista de los suelos que cultivan.

Esta norma hace corresponder a las Provincias la realización de obras de infraestructura para la conservación y recuperación de los suelos, el apoyo a la investigación y la experimentación en dicha materia, y la implementación de medidas de estímulo a los productores.

Los principales resultados obtenidos a partir de su sanción han sido 22 provincias adheridas, 19 provincias subsidiadas, 82 distritos de conservación de suelos subsidiados, 202 consorcios subsidiados, 1022 productores subsidiados. Como una gran dificultad debe citarse que la disponibilidad de fondos está sujeta a la aprobación del presupuesto del Congreso, y que la esencia de la Ley tardó en llegar a importantes instituciones generadoras de ciencia y tecnología.

Si bien la Ley 22.428 se encuentra vigente, la misma no es de aplicación actualmente en virtud de carecer del presupuesto necesario para llevar a cabo su propósito.

- **Ley N.º 24.701** adhesión a la *“Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación” de 1996:*

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD, o UNCCD por su sigla en inglés) fue adoptada el 17 de junio de 1994 en París y abierta para su firma el 14 de octubre de 1994, en reconocimiento a que la desertificación es uno de los más graves problemas a escala mundial, abarcando tanto el ámbito económico como el social y el medioambiental.

Argentina adhirió a la Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación, a través de la ley 24.701, sancionada el 25 de septiembre de 1996.

- **Ley N.º 25.675** *“Ley General del Ambiente” de 2002:*

Esta norma fija los lineamientos de la política nacional en materia de protección ambiental, principios de política ambiental, la definición de presupuestos mínimos y la definición, alcances y consecuencias del daño ambiental.

- **Ley N.º 26.331** *“Presupuestos mínimos de protección ambiental de los Bosques Nativos” de 2007:*

A raíz de que Argentina había perdido prácticamente el 70% de los bosques nativos originales por el avance descontrolado de la frontera agropecuaria, en el año 2007 se sanciona la norma bajo el N.º 26.331.

Entre los principales aspectos se busca una demora a los desmontes hasta que cada provincia realice un Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos Participativo. Contempla también la obligatoriedad de realizar un Estudio de Impacto Ambiental y una Audiencia Pública antes de autorizar un desmonte, respetar los derechos de las comunidades indígenas y campesinas sobre los bosques que utilizan, y la prohibición de la quema a cielo abierto de los residuos derivados de desmontes o aprovechamientos sostenibles de bosques nativos.

- **Ley N.º 26.339** *“Régimen de presupuestos mínimos para la preservación de los glaciares y ambientes periglaciares” de 2010:*

La actividad económica relacionada con la minería provocó una controversia en la opinión pública por la contaminación del medio ambiente, el excesivo consumo de agua, y la gran cantidad de espacio utilizado para el desarrollo de los proyectos.

En el año 2010 se aprobó la Ley N.º 26.639 que establece los presupuestos mínimos para la protección de los glaciares y del ambiente periglacial con el objeto de preservarlos como reservas estratégicas de recursos hídricos para el consumo humano; para la agricultura y como proveedores de agua para la recarga de cuencas hidrográficas; para la protección de la biodiversidad; como fuente de información científica y como atractivo turístico.

La ley también prohíbe la liberación de elementos contaminantes y la exploración minera e hidrocarburífera en los glaciares y ambientes periglaciares.

En relación con el ordenamiento jurídico provincial, debe indicarse que los recursos hídricos son patrimonio de las Provincias, por lo que las normativas a nivel provincial en materia de ambiente y regulación del suelo son numerosas y variadas. Por ello, adicionalmente a las citadas normas nacionales, existe una gran cantidad de Decretos y Leyes en las 23 Provincias de la República Argentina.

1.6. Conclusiones

La gran extensión superficial, la variabilidad geográfica de los parámetros que condicionan los procesos erosivos y las características extremas de estos factores en el territorio argentino, son las causales de la presencia de regiones con alta producción de sedimentos y extensas áreas susceptibles a la pérdida de suelo en las zonas agropecuarias.

Pero la caracterización de la problemática de los sedimentos debe contemplar no solo los procesos de generación en las cuencas de aporte, sino también el transporte en los sistemas de drenaje y los procesos morfológicos asociados en los cauces.

Los fenómenos son tan complejos, pero al mismo tiempo tienen una relevancia económica y ambiental tal, que ameritan un gran compromiso de los organismos públicos y privados para su estudio e interpretación, contemplando una visión integral desde las diversas disciplinas técnicas.

1.7. Referencias bibliográficas

Casas R. y Albarracín G. (2015). *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina*. Tomo I y Tomo II. Buenos Aires,

Colazo J.C.; Panebianco J. E.; Del Valle H. F.; Godagnone R. E. y Buschiazzi, D. E. (2008). "Erosión potencial de suelos de Argentina. Efecto de registros climáticos de distintos periodos". XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis.

Davico, M. A.; Buccheri, M.; López, L.; Burgos, V. (2018). "Marco normativo general de Argentina sobre regulación del suelo vinculados a fenómenos de erosión y otros". Informe Interno INA (CELA, CRA).

Gaitán, J.; Navarro, M. F.; Tenti Vliegen, L.; Pizarro, M. J.; Carfagno, P.; Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. Instituto de Suelos - Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIRN), Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias – INTA, 1ª. ed. Buenos Aires: Ediciones INTA.

González, M. A.; Bejerman, N. J. (Editores) () Peligrosidad geológica en Argentina. Publicación Especial N.º 4 ASAGAI. Buenos Aires.

Instituto Nacional del Agua (INA). (2002-2004). Proyecto PICT 9351.

Instituto Nacional del Agua (INA) (2018). Sitio web: <https://www.ina.gob.ar/lha/hfluvial/catalogo/web/index.html>

Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica (SIPH). *Base de Datos Hidrológica Integrada*. Sitio web: <https://www.argentina.gob.ar/secretaria-de-infraestructura-y-politica-hidrica/base-de-datos-hidrologica-integrada>

Spalletti, P.; Irigoyen, M. (2016). "Transportes de sedimentos en ríos andinos con vertiente atlántica de Bolivia y norte de Argentina". XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide for conservation planning. *USDA Handbook 537*. Washington, 57 p.

Perspectivas del estado de los sedimentos en Brasil

Henrique Marinho L. Chaves¹ (hlchaves@terra.com.br)

2.1. Introducción

Brasil presenta un alto riesgo de erosión y sedimentación, en función de su clima tropical, predominancia de suelos erodibles, y extensas áreas de agricultura y actividad pecuaria. Los impactos de estos dos procesos incluyen los medioambientales (degradación permanente de los suelos, desertificación y sedimentación de sus cauces y embalses), y los socioeconómicos (reducción de la productividad agropecuaria, éxodo rural, aumento de costo de tratamiento de agua).

En términos de erosión, Brasil tiene una pérdida de suelos total de millones de toneladas/año. Sin embargo, con el avance de tecnologías de conservación de suelos (siembra directa, terrazas en nivel y reforestación), y manejo de sedimentos (construcción de presas que permiten el pasaje de sedimentos), ya se observa una importante evolución, con subsecuentes ventajas socioeconómicas y medioambientales.

El objetivo de este trabajo es presentar un panorama del estado de la erosión y sedimentación en Brasil e identificar las iniciativas aplicadas para su mitigación, permitiendo el desarrollo sustentable del país. Para eso, los capítulos abajo presentan aspectos medioambientales y socioeconómicos relativos a la erosión, a la sedimentación, al control de erosión y sedimentación, y perspectivas futuras en el tema.

2.2. Erosión de los Suelos en Brasil

La combinación de alta erosividad de las lluvias, alta erodibilidad de los suelos, y ocupación de 150 millones de hectáreas con actividad agropecuaria en Brasil resulta en altas tasas de erosión de sus suelos y gran producción de sedimentos en el país.

Silva (2004) calculó la erosividad de la lluvia (R) para Brasil, utilizando 8 ecuaciones regionales de R. En función de la gran variabilidad pluviométrica nacional, se observa, en la Figura 2-1 que la erosividad varía de 2.000 a 22.000 MJ mm ha⁻¹h⁻¹año⁻¹ en el país.

En función de la estructura, profundidad y textura típicas de los suelos brasileños, su erodibilidad es muy variable. Los suelos predominantes en Brasil son oxisuelos y entisuelos, con erodibilidad variando entre 0,040 < K < 0,012 t h MJ⁻¹ mm⁻¹.

Teniendo en cuenta que el nomograma de Wichmeier & Smith (1978), desarrollado originalmente para suelos templados, no es aplicable para suelos tropicales (Lo *et al.*, 1985), una ecuación para el factor K de la USLE fue desarrollada para suelos brasileños por Silva *et al.* (1999). Como esta ecuación utiliza 37 variables explicativas la estimativa de K es compleja en locales con datos escasos. Buscando simplificar el cálculo de K para suelos de las sabanas brasileñas, Chaves (1996) obtuvo la siguiente ecuación, utilizando solamente 4 variables explicativas, de fácil obtención:

$$K = -0,000430 (AF+SIL) CO^{-1} + 0,000437 AR + 0,000862 SIL \quad (R^2 = 0,94) \quad [1]$$

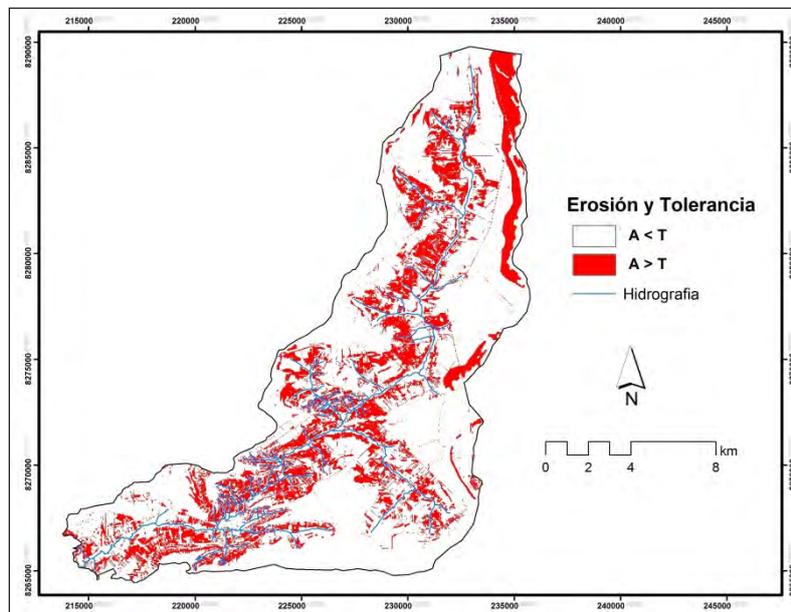
¹ Facultad de Tecnología- Universidad de Brasíla, Brasil.

Donde: K = erodibilidad del suelo ($t h MJ^{-1} mm^{-1}$);
AF = contenido de arena fina del suelo (%);
SIL = contenido de limo del suelo (%);
CO = carbono orgánico del suelo (%);
AR = contenido de arena total del suelo (%).

En función de la gran variabilidad climática, pedológica, topográfica y de uso del suelo de Brasil, la pérdida de suelos en el país es muy variable, desde 0,5 t/ha.año para bosques, hasta > 30 t/ha.año para áreas agrícolas, con un promedio de 5 t/ha.año.

Cuando la pérdida de suelo (A) ultrapasa la tolerancia a la erosión (T), hay un riesgo de degradación permanente del suelo (Montgomery, 2007). Esta información debe ser utilizada en la planificación del control de erosión en cuencas, identificando y priorizando las áreas donde $A > T$, como en el caso de la cuenca del Pipiripau (Figura 2-1).

Figura 2-1. Áreas donde $A > T$ en la cuenca del río Pipiripau (DF)



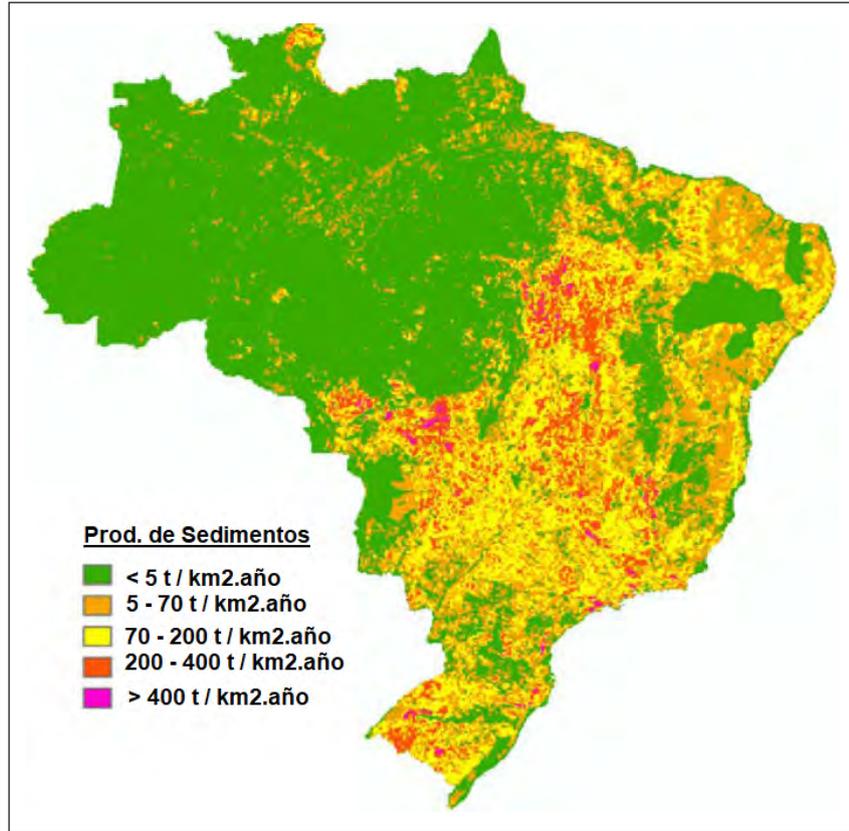
Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Chaves (2012).

2.3. Sedimentación en Brasil

La sedimentación es un proceso resultante de la producción de sedimentos en las laderas y dependiente de la geomorfología, hidrología, y otros aspectos fisiográficos de las cuencas. En términos de la producción de sedimentos, la Figura 2-2 presenta las tasas promedio observadas en Brasil.

Figura 2-2. Producción de sedimentos en Brasil



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

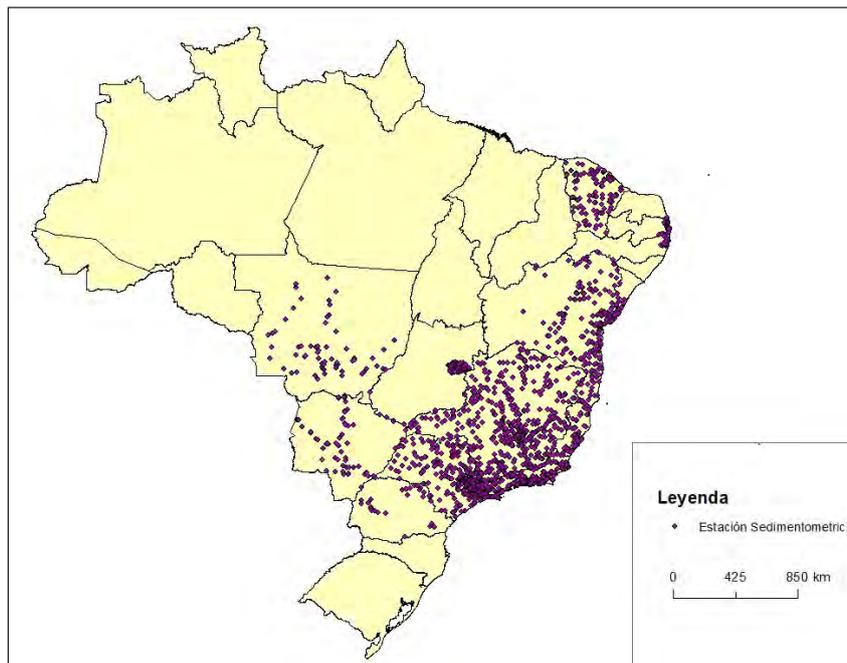
Fuente: Campagnolli (2006).

Para caracterizar la calidad del agua en relación con la sedimentación, Brasil dispone de 2.058 estaciones, donde la turbidez es periódicamente medida (Figura 2-3). Estas mediciones permiten la identificación de áreas críticas de producción de sedimentos, para futuras acciones de control y gestión. En el año 2014, la turbidez promedio en las 2.058 estaciones fue de 29 NTU, con un desvío patrón de 58 NTU (Figura 2-4).

El aporte de sedimentos anual a los cauces y presas (t/año), que es el producto de la erosión total aguas arriba (t/año) y de la relación de aporte de sedimentos-SDR (Renfro, 1975), es un factor importante para la estimación de la vida útil de los embalses. La SDR, por su vez, puede ser calculada por varias ecuaciones existentes en la literatura.

Sin embargo, la alta variabilidad resultante de los valores de SDR calculados para una misma cuenca indica la complejidad del cálculo del aporte de sedimentos. Chaves (2010) obtuvo valores muy variables de SDR para una cuenca de 240 km² en el Distrito Federal de Brasil, utilizando distintas ecuaciones disponibles en la literatura (Figura 2-5).

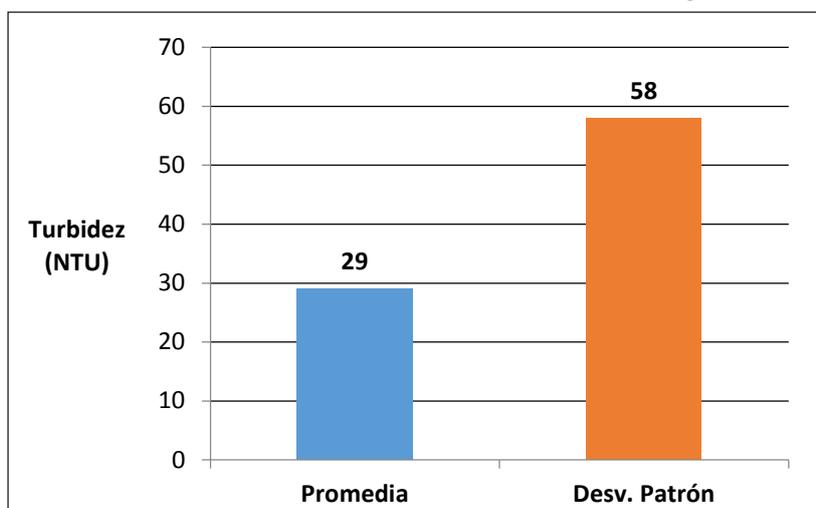
Figura 2-3. Estaciones sedimentométricas en Brasil



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: www.ana.gov.br

Figura 2-4. Turbidez promedio de las 2.058 estaciones de la Figura 2-3, en 2014



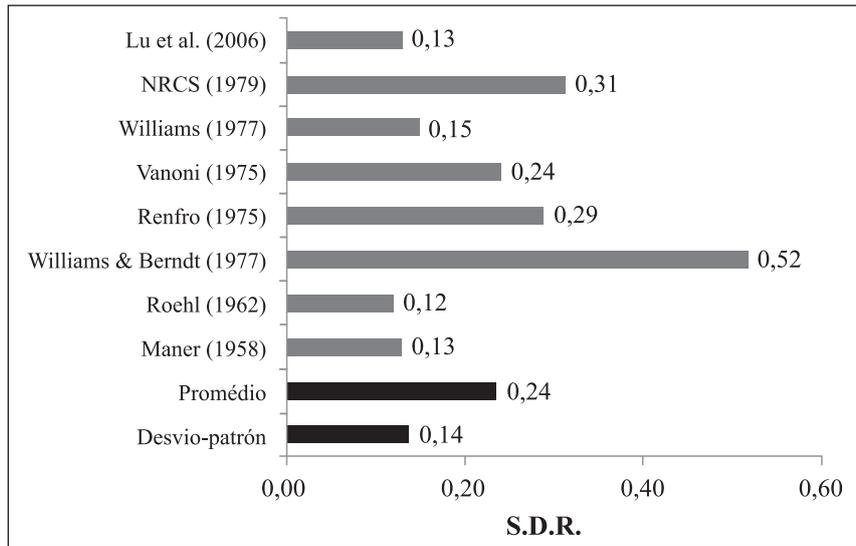
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 2-5, el SDR promedio para la cuenca del río Pípiripau fue 0,24, con un significativo desvío-patrón (0,14), indicando la importancia de la adecuada selección de la ecuación de SDR para la estimativa del aporte de sedimentos en cuencas.

El caudal sólido anual es obtenido en Brasil con curvas-llave debidamente calibradas para la sección, a partir del caudal líquido. Sin embargo, para estimaciones realísticas, la carga sólida total, incluyendo los sedimentos en suspensión (*suspended load*) y los sedimentos de arrastre (*bed load*) deben ser medidos.

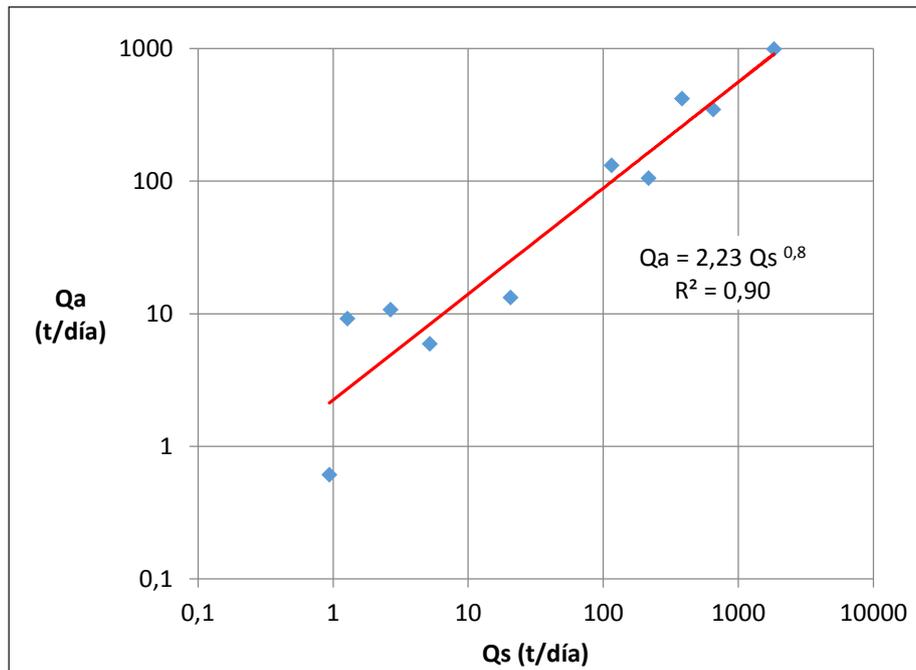
Como el último proceso es más difícil de obtener, modelos apropiados, como el de Colby (1964), es utilizado para calcular la carga de arrastre. La Figura 2-6 presenta la relación entre el sedimento de arrastre y el sedimento en suspensión para el río Areias, en Brasil. Una importante conclusión de esta figura es que, contrariamente a la suposición de que la carga de arrastre es 5-20% de la carga en suspensión (Yang, 1996), esta relación fue mucho más alta en el caso del río Areias.

Figura 2-5. Valores de SDR calculados para la cuenca del río Pípiripau (DF), utilizando 8 ecuaciones distintas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-6. Relación entre el sedimento de arrastre (Q_a) y el sedimento en suspensión (Q_s) en el río Areias, Brasil



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que el potencial de sedimentación de embalses es función de distintas variables fisiográficas (área de la cuenca, SDR) y sedimentológicas (producción de sedimento, índice de sedimentación de la presa), este potencial es muy variable en Brasil. Consecuentemente, la vida útil de los embalses también varía.

El embalse de Itaipu, por ejemplo, con volumen útil de $25 \times 10^9 \text{ m}^3$, tiene un caudal sólido total promedio de $30 \times 10^6 \text{ t/año}$, una eficiencia de retención de sedimentos de 86%, y una vida útil de 200 años, considerando el nivel de la toma de agua de la presa. Sin embargo, una presa más chica (a hilo de agua), como Itiquira, con un volumen útil de $1,0 \times 10^6 \text{ m}^3$, presenta un caudal sólido anual de $1,0 \times 10^6 \text{ t/año}$, una eficiencia de retención de 45%, pero una vida útil de solo 12 años (Tabla 2-1).

Tabla 2-1. Variables sedimentológicas de dos presas brasileñas.

Presa	Volumen útil (10 ⁹ m ³)	Caudal sólido (t/año)	Eficiencia de retención (%)	Vida útil (años)
Itaipu	25,0	30 x 10 ⁶	86	200
Itiquira	0,01	1,0 x 10 ³	45	12

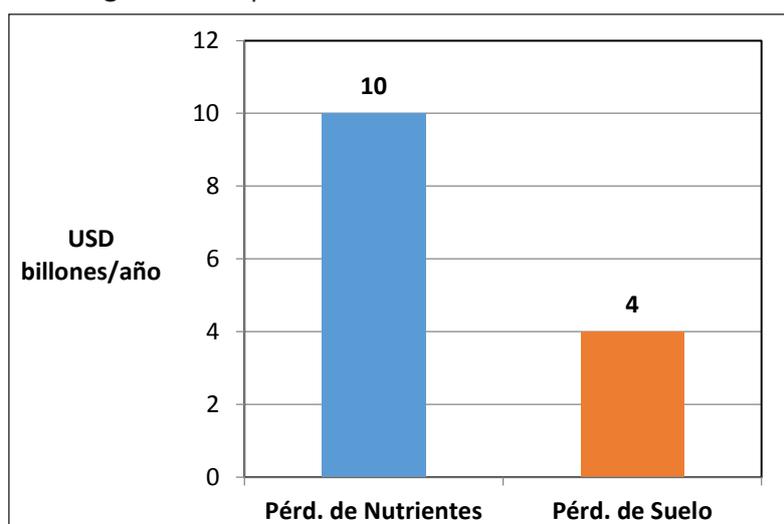
Este tipo de impacto sedimentológico, que amenaza la sustentabilidad medioambiental y de infraestructuras hidráulicas, exige un enfoque distinto sobre el proceso de producción y transporte de sedimentos. Por ejemplo, la utilización del criterio de impacto *on-site* de $A < T$ en las pendientes aguas arriba (e.g., Montgomery, 2007) no garantiza que los impactos *off-site* de la sedimentación, aguas abajo, sean aceptables.

Verheijen & Rickson (2009), por ejemplo, sugieren una tasa máxima de pérdida de suelo de 1,0 t/ha-año para que se eviten impactos significativos de sedimentación en cauces y embalses. Esta importante conclusión debe ser utilizada en el diseño de futuros programas de conservación de suelos en Brasil, teniendo en cuenta no solo aspectos de sustentabilidad agronómica (*on-site*), sino también los impactos sedimentológicos aguas abajo (*off-site*).

2.4. Consecuencias socioeconómicas de la erosión y sedimentación en Brasil

Considerando solo las pérdidas de nutrientes del suelo, el impacto económico de la erosión en Brasil es aproximadamente USD 10 billones/año (Vergara Filho, 1994). Además, teniendo en cuenta que la pérdida de suelo de 1 t/ha.año representa una pérdida económica de USD 1,0/año para el productor (Hansen & Ribaud, 2008), y suponiendo una pérdida total de 4 mil millones de toneladas en las áreas agropecuarias del país, la pérdida económica de la erosión en Brasil representaría USD 4,0 billones/año. En valores totales, la pérdida económica del proceso erosivo en el sector agropecuario sería entonces USD 14 billones/año, un valor significativo (Figura 2-7).

Figura 2-7. Impacto económico de la erosión en Brasil



Fuente: Elaboración propia.

En términos de sedimentación y reducción de vida útil de embalses hidroeléctricos, Marques & Comune (1997) estimaron una pérdida de USD 250 millones (en valores presentes), solamente para los embalses del río Sapucaí. Si este valor fuese extrapolado para todo el sistema hidroeléctrico nacional, la pérdida económica llegaría a USD 25 billones.

Como estas pérdidas de erosión y sedimentación son significativas, afectando la sustentabilidad económica del país, sería muy importante que gestores y *stakeholders* buscaran prácticas y procesos de gestión para reducir la erosión y la sedimentación, a niveles ambiental y económicamente aceptables.

2.5. Medidas de control de Erosión y de manejo de sedimentos en Brasil

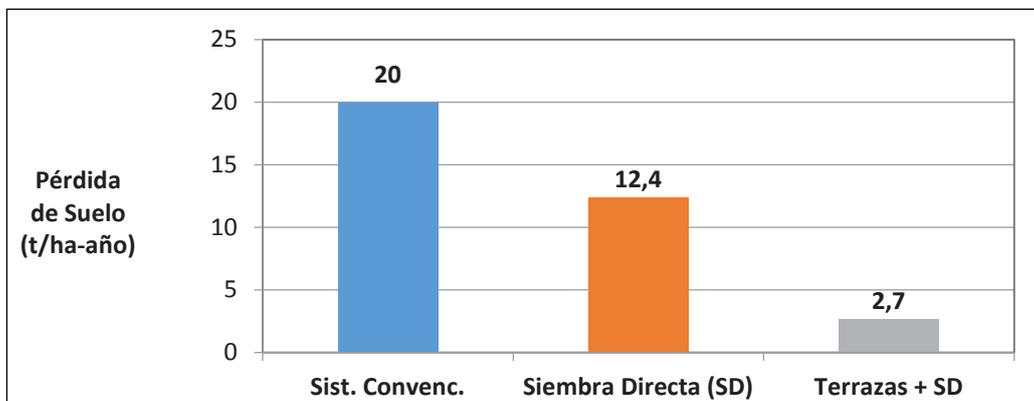
En los años 80, programas integrados de control de erosión en cuencas, como el Programa “Paraná Rural”, fueron implantados en la región sur de Brasil, con resultados muy positivos. En este Programa, prácticas como terrazas en nivel (Figura 2-8), siembra directa, y conservación de carreteras vecinales fueron implantadas, resultando en significativa reducción de erosión en pendientes, y disminución de la sedimentación en los cauces. La Figura 2-9 presenta la reducción de erosión bajo distintas prácticas del Programa, en la provincia de Paraná.

Figura 2-8. Terrazas en nivel, en el Programa “Paraná Rural”



Fuente: Fotografía tomada por el autor.

Figura 2-9. Pérdidas de suelo bajo distintas prácticas del Programa “Paraná Rural”, en comparación con el sistema convencional



Fuente: Elaboración propia.

A pesar del éxito obtenido en el control de erosión en áreas agrícolas del país, hay zonas, como la Amazonia occidental, que naturalmente presentan altas tasas de producción de sedimentos. En el río Madera, por ejemplo, el caudal sólido es de 526×10^6 t/año, uno de los más altos del mundo. Por eso, los embalses recién construidos en el río tuvieron que adaptarse a esta realidad, y manejar los sedimentos de forma sustentable.

En la presa de Santo Antonio, con un volumen útil de apenas $2,0 \times 10^9$ m³ (hilo de agua), la toma de agua y las compuertas fueron diseñadas al nivel del lecho del río, permitiendo el pasaje del flujo de sedimentos (Figura 2-10). Con eso, la vida útil estimada del embalse pasó de 70 a 200 años (Carvalho *et al.*, 2011).

Figura 2-10. Compuertas de la presa de Santo Antonio, al nivel del lecho



Fuente: Fotografía tomada por el autor.

2.6. Perspectivas futuras para el control de erosión y manejo de sedimentos en Brasil

Buscando diseminar el proceso de control de erosión y de sedimentación en las cuencas brasileñas, la Agencia Nacional de Aguas desarrolló, en 2004, el Programa “Productor de Agua”, que utiliza el concepto de pago por servicio ambiental (PSA).

El Programa fue desarrollado para tener una implantación descentralizada, permitiendo que usuarios de agua, ubicados aguas abajo, financien el control de erosión en la cuenca aguas arriba, generando un círculo virtuoso de gestión.

En esta iniciativa, propietarios de tierra que voluntariamente participan del Programa reciben un pago proporcional a la reducción de erosión, generada por el proyecto en sus fincas, utilizando la siguiente ecuación (Chaves *et al.*, 2004):

$$PRE = 100 (1 - C_1 P_1 / C_0 P_0) \quad [2]$$

Donde: PRE (%) = porcentaje de reducción de erosión generado por el proyecto;

C = factor de uso y manejo de la USLE;

P = factor de prácticas conservacionistas de la USLE.

Los suscritos 0 y 1 se refieren a los períodos antes y después del proyecto, respectivamente.

Valores regionalizados de los factores C y P de la USLE (Wischmeier & Smith, 1978) para Brasil fueron compilados por Chaves *et al.* (2004), permitiendo el uso adecuado de la ecuación [2] en distintas combinaciones de uso y manejo del suelo en el país. Una vez calculado el PRE para cada proyecto participante del Programa, el pago por servicio ambiental es proporcional a la reducción de erosión y sedimentación (Tabla 2-2):

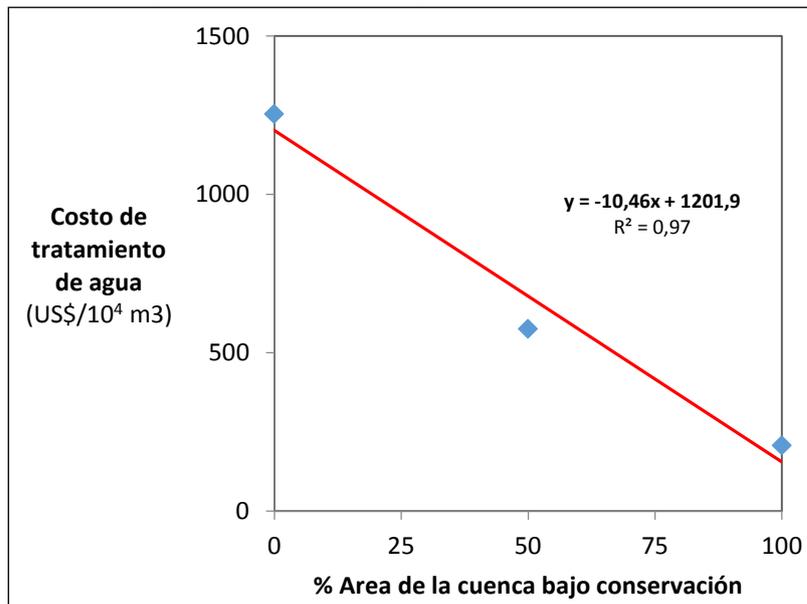
Tabla 2-2. Pagos por la reducción de erosión en el Programa Productor de Agua

P.R.E.	25-50%	51-75%	> 75%
Pago (USD/año)	100	150	200

Fuente: Chaves (2014).

Los beneficios hidrológicos generados para usuarios aguas abajo, como la reducción de la sedimentación, facilitan la compensación ambiental aguas arriba, contribuyendo a la sustentabilidad financiera de los proyectos a largo plazo. La Figura 2-11 presenta el beneficio económico para el sector de saneamiento, resultante de la mejoría de la calidad del agua en los cauces, después de la implantación de programas de conservación del suelo.

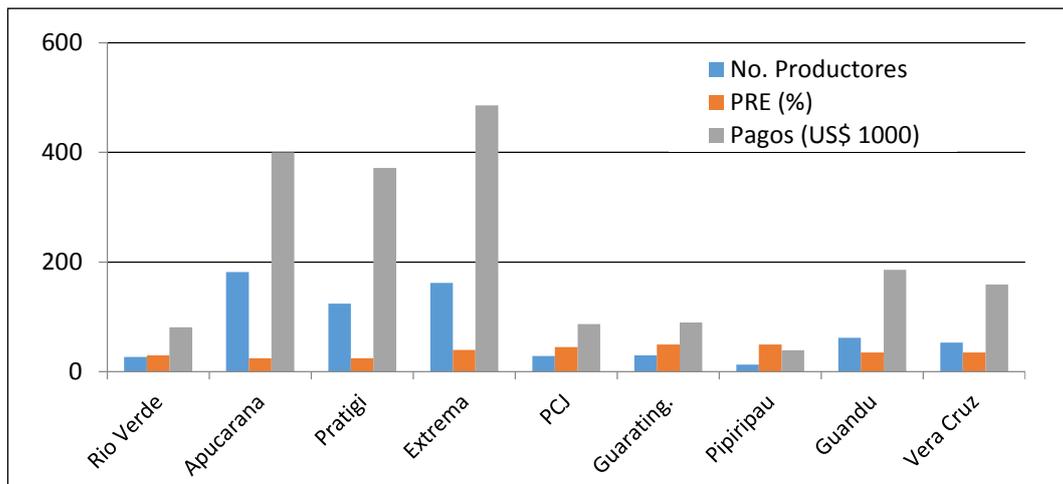
Figura 2-11. Relación entre el costo del tratamiento de agua y el porcentaje de la cuenca bajo conservación en la provincia de Paraná, Brasil.



Fuente: Elaboración propia.

Los números auspiciosos del “Productor de Agua” permitieron que más de 70 cuencas implantasen el programa, con beneficios financieros totales de USD 50 millones. La Figura 2-12 presenta los beneficios de 9 proyectos del Programa “Productor de Agua” implantados en Brasil (Chaves *et al.*, 2004).

Figura 2-12. Beneficios generados en distintas cuencas brasileñas, después de la implantación del Programa “Productor de Agua”



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta el crecimiento acelerado de las ciudades de Brasil en los últimos años, la erosión urbana (Figura 2-13) amenaza la sustentabilidad de los recursos hídricos, requiriendo un manejo apropiado de los sedimentos.

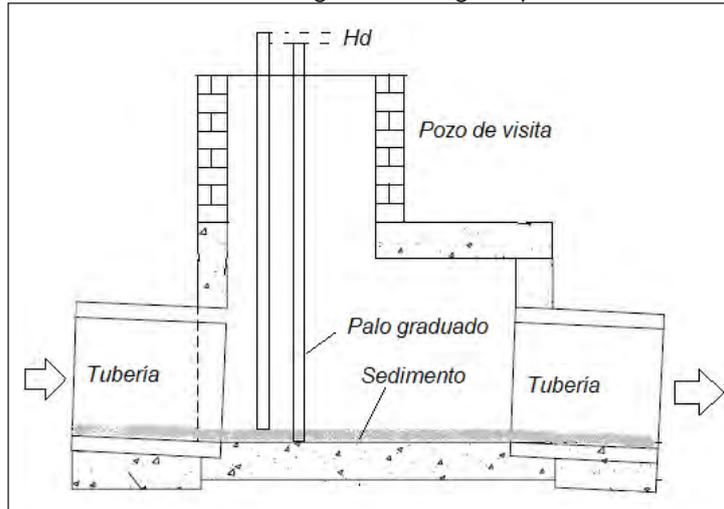
Figura 2-13. Cárcava en el Condominio Noroeste (Brasília-DF).



Fuente: Fotografía tomada por el autor.

Los sedimentos generados en situaciones urbanas son transportados por las galerías de aguas pluviales, cuyas características hidráulicas deben permitir su flujo adecuado, minimizando la deposición interna (Figura 2-14).

Figura 2-14. Sección de una galería de aguas pluviales monitoreada



Fuente: Elaboración propia.

El gradiente crítico (mínimo) para que el sedimento sea transportado en una galería pluvial, principalmente la fracción más gruesa, es (Butler & Davis, 2011):

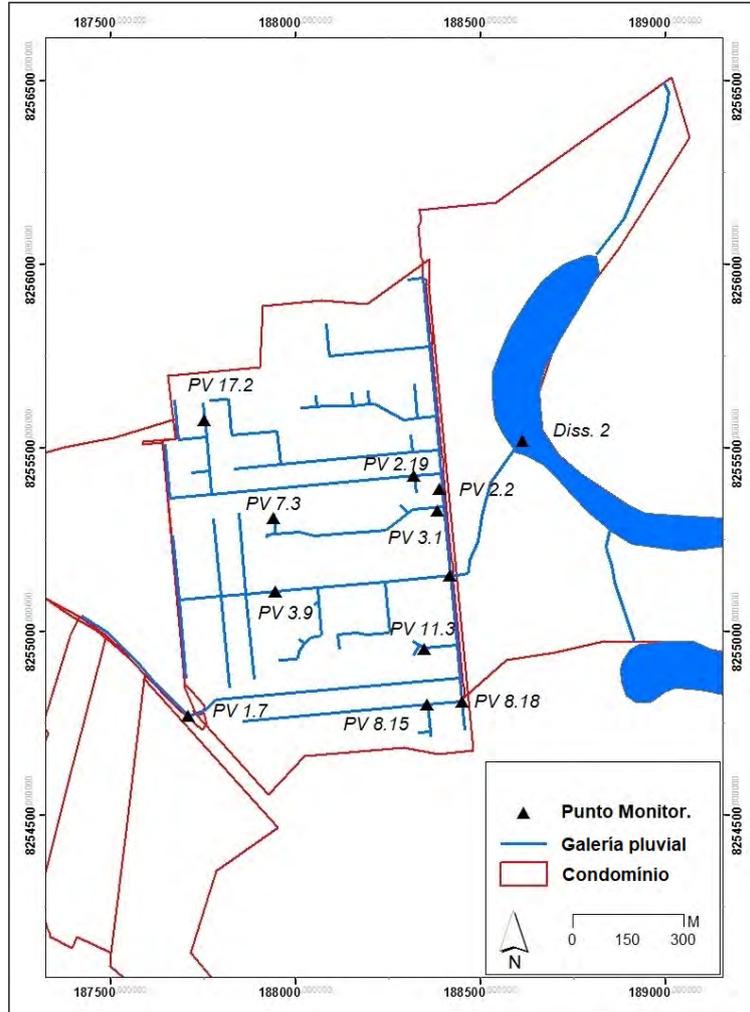
$$S_c = [v_c n / (R/1000)^{2/3}]^2 \quad [3]$$

Dónde:

- S_c = gradiente crítico de la tubería para evitar la deposición (m/m);
- v_c = velocidad crítica del flujo, en m/s (Figura 4);
- n = coeficiente de Manning (0,013 para concreto);
- R = rayo hidráulico en la condición de 80% lleno, en mm ($=0,304 D$)

En el caso del Condominio Noroeste de Brasília-DF (Figura 2-15), el gradiente mínimo fue calculado y comparado con el gradiente de la tubería actual, que presenta tramos donde el criterio de S_c no fue alcanzado, y donde deben tomarse recaudos contra la deposición en las tuberías (Tabla 2-3).

Figura 2-15. Galerías pluviales en el Condominio Noroeste (Brasília-DF), con los puntos de monitoreo de S_c



Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-3. Gradiente de las tuberías de agua pluvial del Cond. Noroeste, indicando en color rojo los puntos donde el criterio de Sc no fue alcanzado, y donde hay riesgo de deposición de sedimentos

Punto	Tipo	Coord. E	Coord. N	Diámetro Tubo (mm)	Grad. actual (%)	Sc (%)
PV 1.10	P. Visita	187468	8256726	600	1,0	0,66
PV 1.12	P. Visita	187582	8256736	800	0,5	0,64
PV 1.15	P. Visita	187565	8256922	1200	1,0	0,59
PV 1.18	P. Visita	187625	8257020	1500	0,6	0,59
PV 1.19	P. Visita	187656	8257023	1500	0,6	0,59
PV 1.23	P. Visita	187907	8257046	1650	0,5	0,59
PV 1.26	P. Visita	187893	8257205	1650	0,5	0,59
PV 1.33	P. Visita	188027	8257339	1650	0,5	0,59
PV 1.35	P. Visita	188053	8257405	1650	0,5	0,59
PV 1.38	P. Visita	188018	8257543	1650	0,5	0,59
PV 10.5	P. Visita	187814	8256757	800	0,7	0,64
PV 14.5	P. Visita	187932	8256768	500	1,0	0,68
Lanz. 4.1	P. Visita	188207	8257575	1650	0,5	0,59
Lanz. 12	P. Visita	188266	8258018	2000	0,5	0,58

Fuente: Chaves (2014).

2.7. Conclusiones

En función de su clima tropical, su relieve y la gran extensión agropecuaria en el país, Brasil presenta un alto potencial de erosión y sedimentación. Los impactos medioambientales y socioeconómicos de estos procesos son importantes, por cuenta de la reducción de la calidad del suelo y del agua.

Para mitigarlos, programas de conservación de suelos y de manejo de sedimentos fueron desarrollados, y sus resultados iniciales indican mejorías significativas para la producción agropecuaria y para la calidad del agua de las cuencas involucradas.

La red de monitoreo nacional, con sus 2.000 estaciones de monitoreo de calidad del agua, permite que la dinámica del proceso sedimentológico sea periódicamente evaluada. Sin embargo, es muy importante que gestores y *stakeholders* establezcan estrategias y medidas integradas de control de erosión y sedimentación, que garanticen el desarrollo sustentable del país.

2.8. Referencias bibliográficas

ANA. Rede Nacional de Qualidade de Agua. Sitio web: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/qualidade-da-agua/rnqa>

ANA (2014). Programa Produtor de Agua- Manual Operativo. Brasília, 67 p.

Butler, D.; Davies, J. (2011). *Urban Drainage*. N. York: Spon Press, 621 p.

Campagnolli, F. (). "The production of sediment of the South American continent: Mapping of the erosion rates based on geological and geomorphological aspects". *Rev. Bras. Geomorf*, 7:3-8.

Carvalho, N. O. C.; Duarte, U. M; Marques, F. B. (2011). "Estudo do assoreamento do reservatório da UHE Santo Antonio – Rio Madeira", in Lima, J. & Lopes, W. (eds.), *Engenharia de sedimentos na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento*. Brasília: ABRH, pp. 268-279.

- Carvalho, N. O. C.; Filizola, Jr.; N. Santos, P. M.; Lima, J. W. (2000). Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Brasília: ANEEL/ANA, 140 p.
- Chaves, H. M. L. (1996). "Modelagem matemática da erosão hídrica: Passado, presente e futuro", in Alvarez, V. H. (ed.), *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentável*. Viçosa: SBCS, pp. 731-750.
- Chaves, H. M. L. (2015). *Plano de controle de procesos erosivos e de sedimentação do Setor Noroeste (DF)*. Brasília-DF: Geológica, 64 p.
- Chaves, H. M. L. (2010). "Relações de aporte de sedimento e implicações de sua utilização no pagamento por serviço ambiental em bacias hidrográficas". *Rev. Bras. Ci. Solo*, 34:1469-1477.
- Chaves, H. M. L.; Braga, B.; Domingues, A. F., Santos, D. G. (2004). "Quantificação dos benefícios ambientais e compensações financeiras do Programa Produtor de Água-ANA: 1. Teoria". *Rev. Bras. Rec. Hídricas*, 9: 5-14.
- Colby, B. R. (1964). "Practical computations of bed material discharge". *J. Hydr. Div. ASCE*, 90.
- Embrapa (2012). *Proposta de atualização da 2ª. Edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: Embrapa.
- Hansen, L.; Ribaud, M. (2008). "Economic measures of soil conservation benefits". *ERS-USDA Tech. Bull. # 1922*, Washington, 32 p.
- Lo, A.; El-Swaify, S. A.; Dangler, E. W.; Shinishiro, L. (1985). "Effectiveness of EI30 as an erosivity index of Hawaii", in El-Swaify, S.A. (ed.), *Soil erosion and conservation*. SCSA, Ankeny, pp. 2384-2392.
- Marques, J. F.; Comune, A. E. "Custo ambiental: Impactos económicos dos sedimentos na geração de energia elétrica". *Econ. Aplic.*, 1:99-113.
- Michelon, E.; Reydon, B. P.; Chichati, M. L. (2014). "Impacto económico do manejo do solo e água em microbacias hidrográficas paranaenses". *Agrop. Tecn.*, 35:54-61.
- Montgomery, D. R. (2007). "Soil erosion and agricultural sustainability". *PNAS*, 104:13268-13272.
- Pinelli, M. P.; Chaves, H. M. L.; Oliveira, M. E. (2013). *Programa de monitoramento hidrossedimentológico da UHE Corumbá*. Brasília, 92 p.
- Renfro, G. W. (1975). "Use of erosion equations and sediment delivery ratios for predicting sediment yield, in present and prospective technology for predicting sediment yield and sources", *USDA-ARS-40*, Washington: USDA, pp. 33-45.
- Silva, A. M. (2004). "Rainfall erosivity map for Brazil". *Catena*, 57:251-259.
- Silva, M.; Curi, N.; Ferreira, M. M.; Lima, J. M.; Ferreira, D. F. (1999). "Proposição de modelos para a estimativa da erodibilidade de latossolos brasileiros". *Pesq. Agrop. Bras.*, 34:2287-2298.
- Vergara Filho, O. (1994). "Estimativa económica das perdas de solo provocadas pela erosão hídrica no Brasil". *Rev. Geográfica*, 120:41-58.
- Verheijen, F. G.; Rickson, R. J. "Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe" (2009). *Earth Sc. Rev.*, 94:23-38.
- Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. (1978). "Predicting rainfall erosion losses: A guide for conservation planning". *USDA Handbook 537*, Washington, 57 p.
- Yang, C. T. (1996). *Sediment transport: Theory and practice*. N. York: McGraw-Hill, 395 p.

Perspectivas del estado de los sedimentos en Chile

Álvaro Zambrano¹ (azambrano@ug.uchile.cl), Pablo García-Chevesich^{2, 3, 4} (pablogarciach@gmail.com), Roberto Garfías³ (rgarfias@uchile.cl), Héctor L. Venegas-Quiñones⁴ (hlvenegasquinones@gmail.com), Roberto Pizarro⁵ (rpizarro@utalca.cl), Carlos Estévez⁶ (estevezcarlos.valencia@gmail.com), y Felipe Pérez⁷ (felipe.perez@mop.gov.cl).

3.1. Introducción

La erosión de suelos y la producción de sedimentos en cuencas puede considerarse un proceso natural, el cual afecta la topografía general de nuestro paisaje. Sin embargo, cuando ocurre erosión acelerada, nutrientes y partículas de suelo abandonan la tierra, disminuyendo su capacidad para la proliferación y conservación de las plantas. En el mismo proceso, cantidades no naturales de sedimentos ingresan a ríos y otros cuerpos de agua ubicados en áreas más bajas. Un exceso de sedimentos en un río, por ejemplo, modifica enormemente la turbidez del agua. Esto afecta directamente a peces y poblaciones de fauna acuática, así como a los ecosistemas fluviales en general, resultando en depósitos de sedimentos en áreas no deseadas (bancos de ríos, invasión de dunas, etc.) (García-Chevesich, 2015).

Las partículas de suelo (sedimentos) son vulnerables a diversos agentes que las impulsan a moverse de un lugar a otro (Govers *et al.*, 1990), fenómeno conocido como “erosión de suelos”. Estos agentes tienen diversos orígenes, como el agua, el viento, la gravedad y el hielo (García-Chevesich, 2015), y son la principal causa de pérdida de nutrientes en suelos productivos (Wei *et al.*, 2006).

Dicha situación ha traído como consecuencia la pérdida de las capas superficiales del suelo, lo que a su vez ha repercutido en las propiedades físicas y químicas de este como ser, pérdida de la estructura, porosidad, nutrientes, etc., lo que hace que un suelo permanezca improductivo por mucho tiempo (García-Chevesich, 2015).

Si analizamos la historia de la erosión de suelos en Chile, podemos darnos cuenta de que el país ha estado recorriendo el mismo sendero por el que la civilización de Isla de Pascua caminó; una civilización que, tras la desaparición de sus bosques y el mal manejo de sus suelos, se vio reducida a la hambruna y la extinción, gracias a los devastadores efectos de la erosión y la desertificación. En su obra *La Araucana* (1550), Alonso de Ercilla describió a Chile como una “fértil provincia”. Sin embargo, durante los últimos siglos se ha desarrollado, como dijo Daniel Contesse en su publicación *El sector forestal chileno: una realidad sustentable*, una batalla campal entre el desarrollo económico y los bosques de Chile, siendo estos últimos derrotados. La batalla comenzó con los pueblos prehispánicos, para continuar en mayor medida con las colonias europeas. Como ocurrió en Isla de Pascua, la destrucción de los bosques era considerada natural y, en cierto grado, inevitable.

Así, al término de la primera mitad del siglo XX, más de 19 millones de hectáreas se encontraban bajo algún estado de erosión en Chile. En sus desesperados intentos por hacer algo al respecto, el científico Federico Albert comenzó a probar especies forestales que pudiesen crecer y estabilizar los suelos erosionados. El investigador fue capaz de encontrar una especie forestal que podría

1 Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza. Grupo Internacional de Investigación Hidrológica.

2 Colorado School of Mines. Department of Civil and Environmental Engineering.

3 University of Arizona. Department of Agricultural and Biosystems Engineering & Department of Hydrology and Atmospheric Sciences.

4 UNESCO. Programa Hidrológico Intergubernamental. Iniciativa Internacional de Sedimentos.

5 Universidad de Talca. Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental.

6 Abogado y consultor independiente.

7 Dirección General de Aguas.

significar la solución del problema de la erosión en Chile: el pino insigne (*Pinus radiata*). Desde entonces, Albert trató de promover la plantación de dicha especie en los terrenos erosionados del país, aunque sin mucho éxito. En este sentido, existen grandes obras que han tratado de advertir sobre las consecuencias de la erosión de los suelos chilenos. Miguel Elgueta y Juan Jirkal publicaron en 1942 *La erosión de los suelos en Chile*, donde denunciaron los graves perjuicios que dicho fenómeno estaba causando en la agricultura a nivel nacional. En 1946, Manuel Rodríguez y José Suárez publican *La conservación de los suelos de Chile* y, un año más tarde, Víctor Bianchi escribió su libro *Erosión, cáncer del suelo*, ambas publicaciones refiriéndose a los problemas provocados por la erosión a nivel nacional. Finalmente, en 1958 aparece *La sobrevivencia de Chile*, escrita por Rafael Elizalde, quien denuncia el peligro en que se encontraba el país a raíz de la destrucción de sus suelos. Uno de los intentos más recientes por concientizar sobre la importancia de la creciente destrucción de los suelos del país está representada por la obra *La conservación del suelo y la erosión: una tierra que se muere*, de Florencio Durán, publicada en 1970.

Sin embargo, pese a dichas advertencias, la erosión nacional hacia la década de 1970 había incluso empeorado, por lo que el Gobierno creó incentivos a la forestación y así el sector forestal chileno se activó, pues las tasas de crecimiento anual del pino insigne representaban una ventaja competitiva, debido a su corta rotación en relación con otros países. Así, se recuperaron miles de hectáreas de suelos erosionados. Sin embargo, aparte del sector forestal, no se ha hecho prácticamente nada por recuperar los suelos erosionados, salvo algunos esfuerzos realizados por ciertas instituciones gubernamentales y universidades, entre otras. Según los registros del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN, 2010), el 64% del suelo disponible en el país (37 millones de hectáreas) presentan algún grado de erosión, perjudicando diversas actividades de la agricultura y la producción de alimentos (Figura 3-1), y casi el 80% de los suelos presenta algún estado de degradación.

Figura 3-1. Desertificación, degradación de tierra y sequía en Chile



Fuente: Suelo Austral consulting/Conaf

Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Suelo Austral Consulting/Conaf.

3.2. Revisión bibliográfica

En Chile se han realizado un sinnúmero de estudios en torno a la erosión y los sedimentos, desde diversos puntos de vista (por ejemplo, erosión eólica, urbana, hídrica, glaciár y sedimentación en ríos y embales, etc.). Además, se han realizado estudios sobre la erosión tanto natural como acelerada (es decir, la erosión ocurrida por causa de actividades humanas). Así, dentro de la extensa disponibilidad de literatura consultada, se pueden mencionar los estudios listados en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Literatura científica relacionada con el estudio de los sedimentos en Chile

Autor y año	Título	Tema	Publicación
Aguilar <i>et al.</i> , 2014	Grain size dependent ^{10}Be concentrations in alluvial stream sediment of the Huasco Valley, Semi-arid Andes region	Erosión natural	<i>Quaternary Geochronology</i>
Balbolín, 2013	Modelación de la sedimentación en el embalse rapel: delta y corriente de turbidez	Embalses	Tesis U. de Chile
Banfield <i>et al.</i> , 2018	Erosion proxies in an exotic tree plantation question the appropriate land use in Central Chile	Erosión hídrica	<i>Catena</i>
Bonilla <i>et al.</i> , 2010	Estimación de la Erosión Hídrica Empleando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) y SIG en Chile Central	Modelación	<i>Chilean Journal of Agricultural Research</i>
Bonilla y Vidal, 2011	Rainfall erosivity in Central Chile	Modelación	<i>Journal of Hydrology</i>
Böning <i>et al.</i> , 2009	Trace element signatures of Chilean upwelling sediments at $\sim 36^\circ\text{S}$	Isótopos	<i>Marine Geology</i>
Bravo-Linares <i>et al.</i> , 2018	First use of a compound-specific stable isotope (CSSI) technique to trace sediment transport in upland forest catchments of Chile	Isótopos	<i>Science of the Total Environment</i>
Carretier <i>et al.</i> , 2014	Erosion in the Andes between 27°S and 40°S : Tectonic, climatic or geomorphic control?	Erosión natural	Capítulo libro
Carretier <i>et al.</i> , 2015	Differences in ^{10}Be concentrations between river sand, gravel and pebbles along the western side of the Central Andes	Erosión natural	<i>Quaternary Geochronology</i>
Carretier <i>et al.</i> , 2015	A note on ^{10}Be -derived mean erosion rates in catchments with heterogeneous lithology. Examples from the western Central Andes.	Erosión natural	<i>ESPL</i>
Carretier <i>et al.</i> , 2018	Review of erosion dynamics along the major N-S climatic gradient in Chile and perspectives	Erosión natural	<i>Geomorphology</i>
Chandia y Salamanca, 2012	Long-term monitoring of heavy metals in Chilean coastal sediments in the eastern South Pacific Ocean	Sedimentos marinos	<i>Marine Pollution Bulletin</i>
Ciren, 2010	Determinación de erosión potencial y actual de Chile	Sensores remotos	<i>Biblioteca Ciren</i>
Contreras-Reyes <i>et al.</i> , 2013	Sediment loading at the southern Chilean trench and its tectonic implications	Erosión natural	<i>Journal of Geodynamics</i>
García-Chevesich <i>et al.</i> , 2014	Respiratory disease and particulate air pollution in Santiago Chile: Contribution of erosion particles from fine sediments	Erosión eólica	<i>Journal of Environmental Pollution</i>
Iroumé, 1992	Precipitación, escorrentía y producción de sedimentos en suspensión en una cuenca cercana a Valdivia, Chile	Erosión hídrica	<i>Bosque</i>
Jungers <i>et al.</i> , 2013	Active erosion–deposition cycles in the hyperarid Atacama Desert of Northern Chile	Erosión natural	<i>Earth and Planetary Science Letters</i>
Kaiser <i>et al.</i> , 2015	Isoprenoid and branched GDGT-based proxies for surface sediments from marine, fjord and lake environments in Chile	Sedimentos marinos	<i>Organic Geochemistry</i>
Lobo <i>et al.</i> , 2015	Evaluation and improvement of the CLIGEN model for storm and rainfall erosivity generation in Central Chile	Modelación	<i>Catena</i>

Tabla 3-1 (Continuación). Literatura científica más relevante, relacionada con el estudio de los sedimentos en Chile.

Autor y año	Título	Tema	Publicación
Lucassen <i>et al.</i> , 2010	Complete recycling of a magmatic arc: evidence from chemical and isotopic composition of Quaternary trench sediments in Chile (36°-40°S)	Erosión natural	<i>International Journal of Earth Sciences</i>
Mao y Carrillo, 2017	Temporal dynamics of suspended sediment transport in a glacierized Andean basin	Erosión hídrica	<i>Geomorphology</i>
Martínez <i>et al.</i> , 2018	Coastal erosion in central Chile: A new hazard?	Erosión costera	<i>Ocean and Coastal Management</i>
Montade <i>et al.</i> , 2011	Pollen distribution in marine surface sediments from Chilean Patagonia	Sedimentos marinos	<i>Marine Geology</i>
Muñoz y Morante, 2014	Erosión potencial por reconversión productiva en subcuenca Llay-Llay, Chile: Aplicación de unidades de respuesta a la erosión	Modelación	<i>Revista Ciencia y Tecnología</i>
Neary and García-Chevesich, 2013	Hydrology and Erosion Impacts of Mining Derived Coastal Sand Dunes, Chañaral Bay, Chile	Erosión antrópica	<i>Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest</i>
Oyarzún, 1993	Evaluación del modelo U.S.L.E. para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Bío-Bío	Modelación	<i>Bosque</i>
Parra <i>et al.</i> , 2015	Distribution and pollution assessment of trace elements in marine sediments in the Quintero Bay (Chile)	Sedimentos marinos	<i>Marine Pollution Bulletin</i>
Pepin <i>et al.</i> , 2010	Specific suspended sediment yields of the Andean rivers of Chile and their relationship to climate, slope and vegetation	Erosión hídrica	<i>Hydrological Science Journal</i>
Pizarro <i>et al.</i> , 2009	<i>Propuesta de un modelo para estimar la erosión hídrica en la Región de Coquimbo, Chile</i>	Erosión hídrica	Unesco-PHI
Pizarro <i>et al.</i> , 2010	Evaluación de la erosión hídrica superficial en zonas áridas y semiáridas de Chile central	Erosión hídrica	<i>AquaLac</i>
Pizarro <i>et al.</i> , 2013	Soil Erosion in Arid and Semi-Arid Climates of Northern Chile	Erosión hídrica	<i>Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest</i>
Pozo <i>et al.</i> , 2014	Levels of Persistent Organic Pollutants (POPs) in sediments from Lenga estuary, central Chile	Sedimentos marinos	<i>Marine Pollution Bulletin</i>
Rodríguez <i>et al.</i> , 2017	AMS measurement of ¹⁰ Be concentrations in marine sediments from Chile Trench at the TANDAR laboratory	Sedimentos marinos	<i>Nuclear Instruments and Methods in Physics Research</i>
Tucca <i>et al.</i> , 2017	Occurrence of antiparasitic pesticides in sediments near salmon farms in the northern Chilean Patagonia	Sedimentos marinos	<i>Marine Pollution Bulletin</i>
Vargas, 2017	Redistribución de las precipitaciones, escorrentía y producción de sedimentos en una microcuenca cubierta por bosque nativo en la provincia de Valdivia	Erosión hídrica	Tesis U. Austral

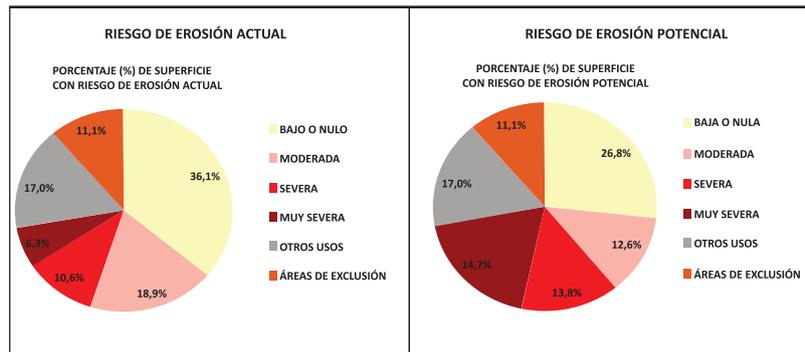
Sin embargo, tal vez el estudio más importante a nivel nacional es el realizado por Cirén (2010), titulado “Determinación de erosión potencial y actual de Chile”. La metodología de este estudio, a grandes rasgos, consistió en un análisis interpretativo de imágenes satelitales Landsat TM 5, datos de estudios agrológicos, curvas de nivel e índices espectrales, comparados con la información que se recolectó en terreno a lo largo del país. Toda esta información se integró en un sistema de información geográfica.

Por otro lado, en el caso de la estimación de la erosión potencial, esta fue evaluada mediante un modelo cualitativo llamado IREPOT, basado en una conceptualización de la erosión potencial que relaciona las características individuales del suelo (clima, topografía, y biología), las que se vinculan con la erodabilidad del suelo y la tasa de erosividad de la lluvia, lo que resultó en la tasa de erosión actual a nivel nacional.

Finalmente, las variables básicas del modelo y los índices que fueron derivados de este se clasificaron en cuatro rangos: (1) Bajo, (2) Medio, (3) Alto y (4) Muy Alto. Esta clasificación está en función del efecto de la erosión potencial en algún lugar.

Los resultados del estudio (Figura 3-2), indicaron que la erosión varía significativamente en relación con el tamaño de cada región administrativa. La cantidad de suelos erosionados aumenta desde la zona sur a la zona norte del país. También es importante destacar que se estimó que una superficie de 36,8 millones de hectáreas tiene algún grado de erosión.

Figura 3-2. Superficie de suelo con riesgo de erosión actual y potencial en Chile



Fuente: Cirén, 2010.

Las regiones que presentan los mayores grados de erosión de suelos fueron Coquimbo (84%), Valparaíso (57%) y O'Higgins (52%). Sin embargo, a nivel nacional se puede decir que, en las regiones del norte del país, la degradación del suelo ocurre debido a la erosión natural del lugar, mientras que en la zona central se debe a la acción antrópica. En tanto, en las regiones del sur los índices de erosión severa o muy severa son bajos (el valor está alrededor del 10%) ya que existe una cobertura vegetal que permanece todo o gran parte del año cubriendo al suelo y que los suelos tienen una mayor resistencia al incorporar la materia orgánica.

Por otro lado, en el caso de los resultados sobre la erosión potencial en Chile, se estima un riesgo de ocurrencia de erosión moderada y muy severa de 34,1 millones de hectáreas, lo que corresponde al 62,7% de la superficie del territorio chileno. Los índices de potencial severo o muy severo se encuentran en las regiones de Valparaíso (75,8%), Aysén (73,9%) y Coquimbo (72,1%). La región que posee una mayor superficie de riesgo potencial a la erosión es la región de Aysén, debido a la acción humana, la agresividad climática y la geomorfología de esta zona. En el caso de la zona norte, estos procesos no están presentes en toda el área, sino que se concentran en los valles interiores o en la precordillera andina. En el caso de la zona centro, donde el principal agente erosivo es el agua, las tasas más altas están ubicadas en ambas cordilleras y esto se ve acentuado por la actividad agrícola.

A modo de conclusión, se puede decir que Chile presenta niveles de erosión bastante altos, por lo que sería significativamente necesario contar con alguna legislación que proteja los suelos y el agua. Esta legislación debería incentivar las buenas prácticas agrícolas y la forestación de suelos degradados.

Finalmente, para los propósitos de este capítulo, se realizó una encuesta a nivel nacional para conocer el estado de conocimiento y experiencias en torno a los sedimentos, arrojando las siguientes conclusiones:

- Las técnicas de medición observadas fueron principalmente parcelas de erosión, estacas de fierro, isótopos cosmogénicos, colectores de partículas que son arrastradas por el viento, parcelas de clavos y trampas de sedimentos. Por otro lado, los encuestados mencionaron que conocían otras técnicas, como recipiente de infiltración, perfilómetro lidary pedestales.
- Otros investigadores utilizan modelos más teóricos para calcular la cantidad de sedimentos, como por ejemplo los modelos CTHA, MUSLE, USLE, RUSLE, WEPP.
- En cuanto a las técnicas para prevenir la emisión de sedimentos, los investigadores indicaron que los métodos que utilizan son diques en quebradas, bacanales, zanjas de infiltración, hidrosiembra, muros de contención, curvas de nivel, franjas vivas, subsolado, zanjas de desviación, técnicas de labranza especiales, franjas verdes, diques y terrazas de infiltración. Sin embargo, se puede decir que Chile se encuentra poco actualizado y se aprecia sustancialmente la ausencia absoluta de nuevas tecnologías para controlar la emisión de sedimentos.
- En Chile, los sedimentos se utilizan para el relleno de cárcavas y se usan en la industria de la construcción como materia prima en la elaboración de ladrillos, lozas, tejas, baldosas y áridos. En general, no es muy conocido el uso que se le da a este material ya que no muchos investigadores (60%) conocían sus usos.

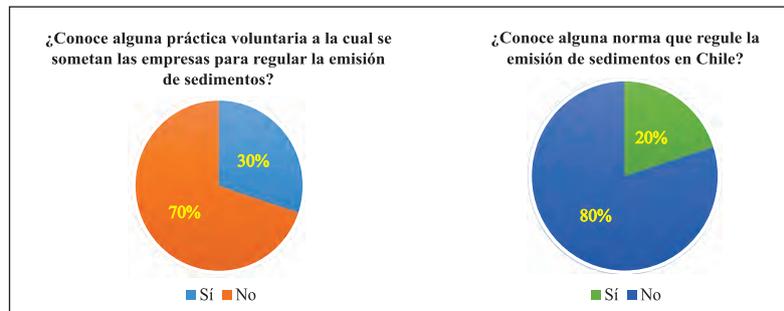
3.3. Políticas

Otro aspecto que se consultó en la encuesta mencionada en la Sección 3.2., fue sobre la existencia de legislación relacionada con la erosión y los sedimentos. La mayoría de los investigadores no conoce alguna legislación al respecto (Figura 3-3). Sin embargo, algunos indicaron que sí existe legislación pero que está dispersa en diversas leyes, por lo que se podría decir que no hay una ley específica que regule la emisión de sedimentos en Chile; solamente existen normas que aluden su existencia, pero no una regulación concreta. Según abogados ambientales consultados, las normas vigentes son las siguientes:

- Código Sanitario.
- Decreto con fuerza de ley N.º 382 de 1988.
- Decreto con fuerza de ley N.º 70 de 1988 sobre fijación de tarifas de servicios de agua potable y alcantarillado.
- Decreto con fuerza de ley N.º 735 de 1969.
- Decreto supremo N.º 351 (1992) del Ministerio de Obras Públicas.
- Decreto supremo N.º 90: Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a la descarga de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
- Ley 19 300 en su artículo 40.

- Ley 20 283 de recuperación del bosque nativo y fomento forestal.
- Norma 1 333 sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos.
- Norma Chilena 409/1 Agua potable - Parte 1: Requisitos.

Figura 3-3. Resultados de las encuestas sobre el conocimiento de prácticas voluntarias y normas relacionadas con los sedimentos en Chile



Fuente: Elaboración propia.

Cuando a los investigadores se les preguntó si conocían alguna práctica que regulara la emisión de sedimentos, las respuestas solo se enfocaron en el control de erosión, mencionando programas que únicamente refieren a ese tema. Además, los programas existentes se enfocan solamente en la agricultura (Buenas Prácticas Agrícolas) y en algunos aspectos que controlan la certificación forestal, olvidando a la industria minera.

3.4. El futuro de la investigación en torno a los sedimentos

En cuanto a las áreas en las que se debería enfocar la investigación, los científicos relacionados con el tema tienen diversas visiones, dependiendo de los enfoques de cada uno. Algunos creen que los esfuerzos deben estar concentrados en las áreas silvestres protegidas del país, mientras que otros afirman que los estudios deben estar asociados a actividades antrópicas, como la actividad agrícola, forestal, minera, ganadera y urbana, entre otras. Otra forma de cuantificar la pérdida de suelo es a través del modelamiento de procesos, en los que se pueden identificar por separado las influencias que tienen diversos factores en el proceso de erosión, por ejemplo, clima, geomorfología y sismos (dentro de los factores naturales), y uso del suelo (dentro de los factores antrópicos). Con toda esta información combinada es posible simular la combinación de escenarios que permitan conocer la mejor combinación de uso de suelos en un lugar.

Sin embargo, algunos científicos nacionales creen que la investigación debe enfocarse en sensores remotos que permitan cuantificar la pérdida de suelo, mientras que otros creen que debe enfocarse en técnicas de agroforestería, silvopastoreo, técnicas de conservación de suelos, y determinación de la cantidad de sedimentos en los embalses. Finalmente, se indica que se debe investigar en la dimensión económica de la pérdida de suelos y su efecto en el entorno.

También es importante destacar que Chile posee 70 estaciones de medición de sedimentos a lo largo del país, la mayoría en la zona sur. Todas estas estaciones son manuales, por lo que se recomienda la incorporación de tecnologías de medición automáticas.

En cuanto a la incorporación de normativas que tengan por objetivo la prevención de la emisión de sedimentos, algunos expertos creen que para prevenir dicho proceso se deben regular las intervenciones silvícolas en quebradas y cursos de aguas, dentro de los planes de manejo. También se propone crear un reglamento que regule la conservación del suelo, que debería contener instrumentos de gestión que permitan la investigación necesaria para enfocar las medidas en zonas

concretas e incentivar a todos los actores sobre el cuidado del recurso suelo, así como también capacitar personal en la fiscalización y monitoreo de estos problemas. Como resultado, es necesario evaluar la condición actual de regulación identificando sus fortalezas y debilidades, para poder avanzar en el progreso.

3.5. Agradecimientos

Los autores de este capítulo agradecen a las siguientes personas que dedicaron tiempo y recursos, para contribuir con información sobre el estado del arte de los sedimentos en Chile: Alfredo Ibáñez (Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, CTHA), Carlos Ovalle (INIA), Christian Hepp (INIA), Darío Salas Salinas (Corporación Nacional Forestal, CONAF), Germán Ruiz, Juan Pablo Flores (CIREN), María Antonieta Martínez (CONAF), Mauricio Galleguillos (Universidad de Chile), Rafael González (CONAF), Rodrigo Osorio (Servicio Agrícola y Ganadero, SAG) y Sebastien Carretier (IRD).

3.6. Referencias bibliográficas

- Aguilar, G.; Carretier, S.; Regard, V.; Vassallo, R.; Riquelme, R.; Martinod, J. (2014). "Grain size-dependent ^{10}Be concentrations in alluvial stream sediment of the Huasco Valley, a semi-arid Andes region". *Quaternary Geochronology*, 19, 163-172.
- Balbontín, J. (2003). "Modelación de la sedimentación en el embalse rapel: delta y corriente de turbidez". *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 111 pp.
- Banfield, C. C.; Braun, A. C.; Barra, R.; Castillo, A.; Vogt, J. (2018). "Erosion proxies in an exotic tree plantation question the appropriate land use in Central Chile". *CATENA*, 161, 77-84.
- Bonilla, C. A.; Reyes, J. L.; Magri, A. (2010). "Estimación de la Erosión Hídrica empleando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) y SIG en Chile Central". *Chilean journal of agricultural research*, 70(1), 159- 169.
- Bonilla, C. A.; Vidal, K. L. (2011). "Rainfall erosivity in central Chile". *Journal of Hydrology*, 410(1-2), 126-133.
- Böning, P.; Brumsack, H. J., Schnetger, B.; Grunwald, M. (2009). "Trace element signatures of Chilean upwelling sediments at ~ 36 S". *Marine Geology*, 259(1-4), 112-121.
- Bravo-Linares, C.; Schuller, P.; Castillo, A.; Ovando-Fuentealba, L.; Muñoz-Arcos, E.; Alarcón, O.; ...; Bustamante-Ortega, R. (2018). "First use of a compound-specific stable isotope (CSSI) technique to trace sediment transport in upland forest catchments of Chile". *Science of The Total Environment*, 618, 1114-1124.
- Carretier, S.; Tolorza, V.; Rodríguez, M. P.; Pepin, E.; Aguilar, G.; Regard, V.; ...; Hérial, G. (2015). "Erosion in the Chilean Andes between 27 S and 39 S: tectonic, climatic and geomorphic control". *Geological Society, London, Special Publications*, 399(1), 401-418.
- Carretier, S.; Regard, V.; Vassallo, R.; Aguilar, G.; Martinod, J.; Riquelme, R.; ...; Audin, L. (2015). "Differences in ^{10}Be concentrations between river sand, gravel and pebbles along the western side of the central Andes". *Quaternary Geochronology*, 27, 33-51.
- Carretier, S., Regard, V., Vassallo, R., Martinod, J., Christophoul, F., Gayer, E., ... y Lagane, C. (2015). "A note on ^{10}Be -derived mean erosion rates in catchments with heterogeneous lithology: examples from the western Central Andes". *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(13), 1719-1729.
- Carretier, S.; Tolorza, V.; Regard, V.; Aguilar, G.; Bermúdez, M. A.; Martinod, J.; ...; Riquelme, R. (2018). "Review of erosion dynamics along the major NS climatic gradient in Chile and perspectives". *Geomorphology*, 300, 45-68.
- Chandía, C.; Salamanca, M. (2012). "Long-term monitoring of heavy metals in Chilean coastal sediments in the eastern South Pacific Ocean". *Marine pollution bulletin*, 64(10), 2254-2260.

Chile, Ministerio de Agricultura. (2008). Ley de recuperación del bosque nativo y fomento forestal. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=274894>. Fecha de acceso: 8 de junio de 2018.

Chile, Ministerio de Obras Públicas. (1992). Decreto 341: Aprueba reglamento para neutralización y depuración de los residuos líquidos industriales a que se refiere la ley N.º 3 133. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=12568>. Fecha de acceso: 8 de junio de 2018.

Chile, Ministerio de Obras Públicas. (1987). Norma Chilena 1333.Of78: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=265638>. Fecha de acceso: 8 de junio de 2018.

Chile, Ministerio de Obras Públicas. (1988). Decreto con fuerza de ley N.º 70. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=4427>. Fecha de acceso: 8 de junio de 2018.

Chile, Ministerio de Obras Públicas. (1988). Ley general de servicios sanitarios. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=5545>. Fecha de acceso: 8 de junio de 2018.

Chile, Ministerio de Obras Públicas. (2005). Norma Chilena 409/1.Of2005: Agua potable – Parte 1: Requisitos. Recuperado de: <https://ciperchile.cl/pdfs/11-2013/norovirus/NCh409.pdf>. Fecha de acceso: 2 de junio de 2018.

Chile, Ministerio de Salud Pública. (1969). Código Sanitario. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=5595>. Fecha de acceso: 8 de junio de 2018.

Chile, Ministerio de Salud Pública. (1969). Reglamento de los servicios de agua destinados al consumo humano. Recuperada de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=197226>. Fecha de acceso: 8 de junio de 2018.

Chile, Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (1994). Ley sobre bases generales del medio ambiente. Recuperada de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=30667>. Fecha de acceso: 8 de junio de 2018.

Chile, Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2000). DS N.º 90: Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a la descarga de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Recuperada de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=182637>. Fecha de acceso: 8 de junio de 2018.

Ciren (2010). Determinación de erosión potencial y actual de Chile. [en línea] <http://repositoriodigital.corfo.cl/bitstream/handle/11373/3214/06CN12IAM-12_IF.pdf?sequence=14> Fecha de Acceso: 15 julio 2018.

Contreras-Reyes, E.; Jara, J.; Maksymowicz, A.; Weinrebe, W. (2013). "Sediment loading at the southern Chilean trench and its tectonic implications". *Journal of Geodynamics*, 66, 134-145.

Folliott, P. F.; Brooks, K. N.; Neary, D. G.; Tapia, R. P.; García-Chevesich, P. (2013). "Soil erosion and sediment production on watershed landscapes: processes and control". *UNESCO Special Technical Publication N.º 32*. Montevideo, Uruguay: UNESCO, International Hydrological Programme, Regional Office for Science for Latin American and the Caribbean. 73 p.

García-Chevesich, P.A., (2015). *Control de la erosión y recuperación de suelos degradados*. Denver, CO.: Outskirts Press. 469 pp.

García-Chevesich, P. A.; Alvarado, S.; Neary, D. G.; Valdes, R.; Valdes, J.; Aguirre, J. J.; Olivares, C. (2014). "Respiratory disease and particulate air pollution in Santiago Chile: contribution of erosion particles from fine sediments". *Environmental pollution*, 187, 202-205.

Govers, G.; Everaert, W.; Poesen, J.; Rauws, G.; De Ploey, J.; Lautridou, J. P. (1990). "A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion". *Earth Surface Processes and Landforms*, 15(4), 313-328.

Iroume, A. (1992). "Precipitación, escorrentía y producción de sedimentos en suspensión en una cuenca cercana a Valdivia, Chile". *Bosque* 13(2): 15-23.

Jungers, M. C.; Heimsath, A. M.; Amundson, R.; Balco, G.; Shuster, D.; Chong, G. (2013). "Active erosion–deposition cycles in the hyperarid Atacama Desert of Northern Chile". *Earth and Planetary Science Letters*, 371, 125-133.

- Kaiser, J.; Schouten, S.; Kilian, R.; Arz, H. W.; Lamy, F.; Damsté, J. S. S. (2015). "Isoprenoid and branched GDGT-based proxies for surface sediments from marine, fjord and lake environments in Chile". *Organic Geochemistry*, 89, 117-127.
- Lobo, G. P.; Frankenberger, J. R.; Flanagan, D. C.; Bonilla, C. A. (2015). "Evaluation and improvement of the CLIGEN model for storm and rainfall erosivity generation in Central Chile". *Catena*, 127, 206-213.
- Lucassen, F.; Wiedicke, M.; Franz, G. (2010). "Complete recycling of a magmatic arc: evidence from chemical and isotopic composition of Quaternary trench sediments in Chile" (36-40 S). *International Journal of Earth Sciences*, 99(3), 687-701.
- Mao, L.; Carrillo, R. (2017). "Temporal dynamics of suspended sediment transport in a glacierized Andean basin". *Geomorphology*, 287, 116-125.
- Martínez, C.; Contreras-López, M.; Winckler, P.; Hidalgo, H.; Godoy, E.; Agredano, R. (2018). "Coastal erosion in central Chile: A new hazard?". *Ocean y Coastal Management*, 156, 141-155.
- Montade, V.; Nebout, N. C.; Kissel, C.; Mulsow, S. (2011). "Pollen distribution in marine surface sediments from Chilean Patagonia". *Marine Geology*, 282(3-4), 161-168.
- Muñoz, J.; Morante, J. (2014). "Erosión potencial por reconversión productiva en subcuenca Llay-Llay, Chile: Aplicación de unidades de respuesta a la erosión". *Revista Ciencia y Tecnología* 7: 35-47.
- Nearly, D.; García-Chevesich, P. (2013). "Hydrology and Erosion Impacts of Mining Derived Coastal Sand Dunes, Chañaral Bay, Chile". *Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest* 38. 47-52.
- Ortega, C. E. (1993). "Evaluación del modelo USLE para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Bío-Bío". *Bosque*, 14(1), 45-54.
- Parra, S.; Bravo, M. A.; Quiroz, W.; Querol, X.; Paipa, C. (2015). "Distribution and pollution assessment of trace elements in marine sediments in the Quintero Bay (Chile)". *Marine pollution bulletin*, 99(1-2), 256-263.
- Pepin, E.; Carretier, S.; Guyot, J. L.; Escobar, F. (2010). "Specific suspended sediment yields of the Andean rivers of Chile and their relationship to climate, slope and vegetation". *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(7), 1190-1205.
- Pizarro, R.; Morales, C.; Vega, L.; Olivares, C.; Valdés, R.; Balocchi, F. (2009). Propuesta de un modelo para estimar la erosión hídrica en la Región de Coquimbo, Chile. Talca. Universidad de Talca. <<http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002163/216337s.pdf>> Fecha de Acceso: 15 junio 2018.
- Pizarro, R. (2017). Iniciativa Internacional de Sedimentos, ISI, de la UNESCO se reunió en La Habana. U. de Talca: Sala de Prensa. Recuperado de: <http://www.utralca.cl/link.cgi//SalaPrensa/Academia/10970>
- Pizarro, R.; Morales, C.; Vega, L.; Valdés, R.; Olivares, C.; Balocchi, F. (2010). "Evaluación de la erosión hídrica superficial en zonas áridas y semiáridas de Chile Central". *Aqua-Lac*, 2(2), 1-11.
- Pizarro, R.; Morales, C.; García-Chevesich, P.; Follitt, P. F.; Vallejosa, O.; Vega, L.; Balocchi, F. (2011, abril). "Soil Erosion in Arid and Semi-Arid Climates of Northern Chile". *Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest. Arizona-Nevada Academy of Science*.
- Pozo, K.; Urrutia, R.; Mariottini, M.; Rudolph, A.; Banguera, J.; Pozo, K.; ...; Focardi, S. (2014). "Levels of persistent organic pollutants (POPs) in sediments from Lengua estuary, central Chile". *Marine pollution bulletin*, 79(1-2), 338-341.
- Rodrigues, D.; Arazi, A.; Niello, J. F.; Martí, G. V.; Negri, A. E.; Abriola, D.; ...; Hojman, D. (2017). "AMS measurement of ¹⁰Be concentrations in marine sediments from Chile Trench at the TANDAR laboratory". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 395, 1-4.
- Sud-Austral Consulting SpA y CONAF. (2016). "Actualización de cifras y mapas de desertificación; degradación de la tierra y sequía en Chile a nivel de comunas". *Documento técnico* N.º 03. Santiago, CONAF. 215 pp.
- Tucca, F.; Moya, H.; Pozo, K.; Borghini, F.; Focardi, S.; Barra, R. (2017). "Occurrence of antiparasitic pesticides in sediments near salmon farms in the northern Chilean Patagonia". *Marine pollution bulletin*, 115(1-2), 465-468.

Vargas, P. (2007). "Redistribución de las precipitaciones, escorrentía y producción de sedimentos en una microcuenca cubierta por bosque nativo en la provincia de Valdivia". *Memoria para optar al título de Ingeniero Forestal*. Valdivia: Universidad Austral. 33 pp.

Ventra, D.; Rodríguez-López, J. P.; de Boer, P. L. (2017). "Sedimentology and preservation of aeolian sediments on steep terrains: Incipient sand ramps on the Atacama coast (northern Chile)". *Geomorphology*, 285, 162-185.

Wei, W.; Chen, L.; Fu, B.; Huang, Z.; Wu, D.; Gui, L. (2007). "The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China". *Journal of hydrology*, 335(3-4), 247-258.

Perspectivas del estado de los sedimentos en Costa Rica

José Alberto Zúñiga¹ (jzunigam@ice.go.cr)

4.1. Introducción

Costa Rica es un país centroamericano que presenta una geología reciente, suelos de origen volcánico inestables, altas pendientes y precipitaciones, los cuales, sumados a manejos del suelo poco apropiados, propician que el país sea altamente vulnerable frente al fenómeno de la erosión.

A pesar de los impactos en diferentes ámbitos, como la pérdida de suelo cultivable, deterioro en la calidad del agua y hasta la reducción en la capacidad de los embalses, el país aún no cuenta con una estimación global de la erosión.

A nivel bibliográfico, se han encontrado diferentes referencias sobre estimaciones a nivel de parcelas o microcuencas, y cuando ha sido necesario analizar la condición de los sedimentos en algunos embalses del país, se ha realizado la estimación a una mayor escala, como la de cuencas tributarias. Sin embargo, estos estudios no han sido actualizados. En el presente documento se presenta una recopilación de resultados obtenidos de los estudios a nivel de cuenca, que ilustran la magnitud de la pérdida potencial de suelo alrededor del país.

Por otro lado, la producción de sedimentos en determinadas cuencas se evalúa por medio de la estimación del transporte de sedimentos en suspensión, en diferentes estaciones hidrográficas del país, obviando la estimación de la erosión. Estas estimaciones no forman parte del presente documento, dado que la metodología no es comparable con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos

4.2. Estimaciones realizadas

Costa Rica, por su ubicación geográfica, se encuentra expuesto a un clima tropical de alta pluviosidad. Además, sufre periódicamente los efectos indirectos de ciclones tropicales que se traducen en la formación de precipitaciones intensas en la vertiente del Pacífico, las cuales se combinan con una orografía pronunciada que genera erosión a nivel laminar y también deslaves de importancia que contribuyen aún más a la pérdida de suelos.

Tal como se indicó previamente, la erosión se ha estimado en forma puntual en el país y no se cuenta con una determinación de una tasa de erosión a nivel nacional, siendo el método más común la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE).

A continuación se detallará las estimaciones en la zona norte y en la zona central del país.

4.2.1. Zona norte

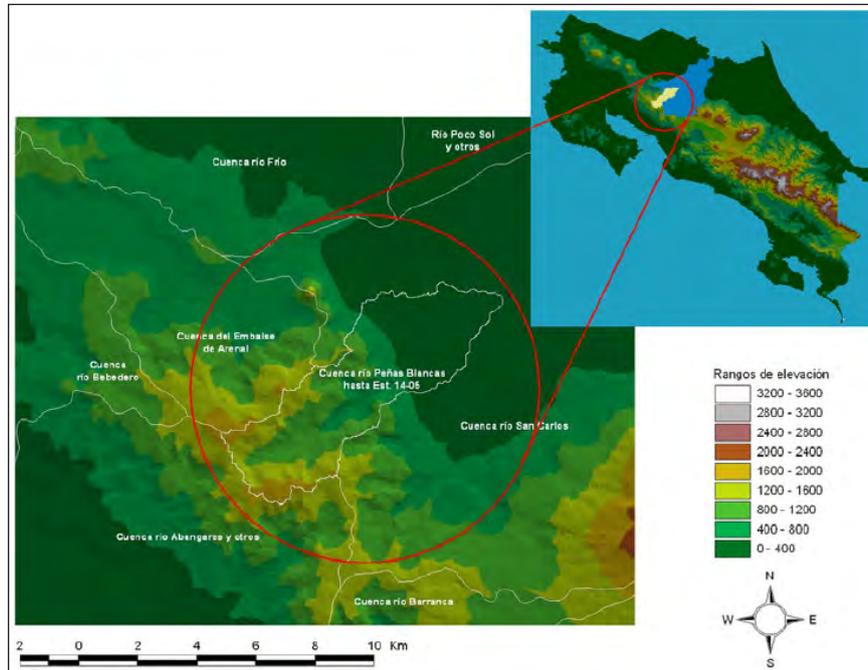
En un trabajo desarrollado por Aylward (2002) para la Organización de las Naciones

Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se indica que, de acuerdo con estudios realizados en la cuenca del embalse Arenal ubicado en la zona norte de país, se habían reportado tasas de erosión entre 35 y 45 t/ha-año. En la cuenca estudiada, se presentan suelos de origen volcánico

¹ Centro de Servicios Estudios Básicos de Ingeniería, Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica.

de formación reciente, constituidos por cenizas, lo que explicaría la tasa de erosión obtenida. En la Figura 4-1 se presenta la ubicación de la zona de estudio.

Figura 4-1. Cuencas de la zona norte



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

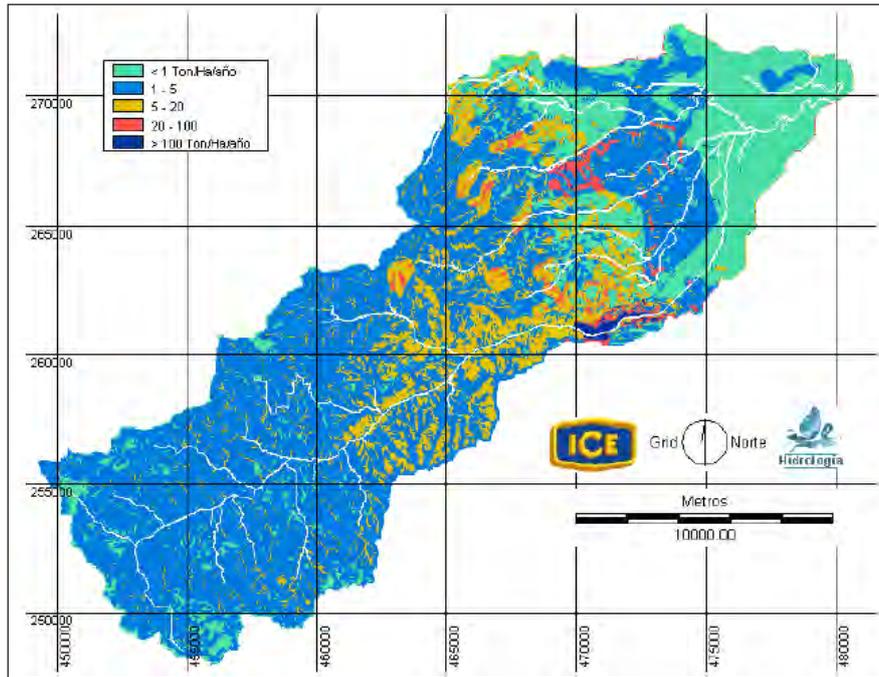
Fuente: Gómez, 2004.

Para la misma zona norte se cuenta también con la referencia de un estudio realizado en la cuenca del río Peñas Blancas, donde se ubica una pequeña central hidroeléctrica, abarcando un área de 240 km². Este trabajo fue realizado por Gómez (2004) y en el informe se detalla paso a paso el cálculo de la erosión potencial, que se estimó por medio del programa CALSITE, desarrollado por HR Wallingford Ltd.

En la Figura 4-2 se presenta el mapa de erosión potencial obtenido. Se puede observar que predomina una producción baja, entre 1 y 5 t/ha-año. Esta cuenca tiene la particularidad de que en ella predomina el bosque, en muchos casos primario, lo cual, por cobertura, y a pesar de una precipitación anual cercana a 6 000 mm, se obtuvo una estimación baja de erosión. Además, se evidencian tasas de erosión superiores a 100 t/ha-año en zonas muy puntuales de la cuenca, que corresponden a un sector del cañón del río donde las pendientes son superiores a 60°.

También es importante agregar que, a pesar de ser una cuenca bien protegida, los movimientos en masa son una amenaza y el embalse de Peñas Blancas, que contaba con 1,3 Hm³ de volumen, llegó a perder alrededor de dos tercios de su capacidad por estos fenómenos y debió establecerse un plan de mantenimiento del embalse para lograr recuperar, en parte, su vida útil.

Figura 4-2. Mapa de erosión potencial cuenca Peñas Blancas



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Gómez, 2004.

4.2.2. Zona central

En la zona central del país, se realizó otra estimación de la erosión potencial en tres cuencas de importancia para la generación eléctrica: Reventazón hasta un sitio conocido como Guayabo; Pirrís, hasta el sitio de presa, y Sarapiquí, en la parte alta. Este estudio fue desarrollado por el Instituto Costarricense de Electricidad, para contar con una aproximación de la tasa de erosión en dichas cuencas. En la Figura 4-3 se presenta un mapa del país que muestra las cuencas estudiadas.

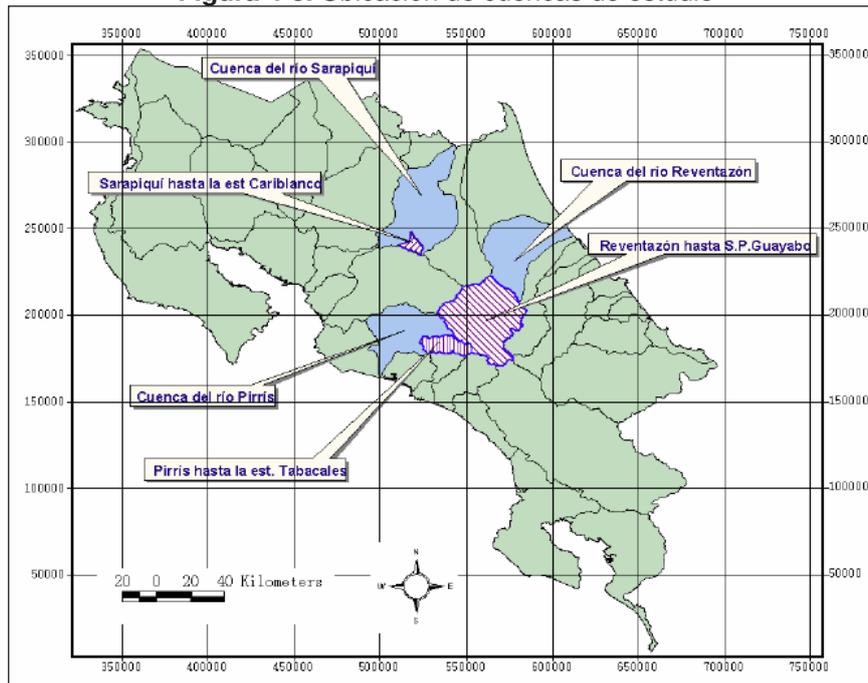
En el estudio presentado por Gómez (2002), se utilizó la USLE para la determinación del potencial de erosión. En la Tabla 4-1 se presenta un resumen de los valores obtenidos para las diferentes cuencas.

Tabla 4-1. Estimaciones de erosión potencial en diferentes cuencas de estudio

Cuenca	Estación	Erosión estimada(t/ha-año)
Reventazón	09-27 S. P. Guayabo	23,5
	09-03 Angostura	23,5
	09-09 Oriente	17,3
	09-19 Palomo	9,4
	09-24 La Troya	37,3
Pirrís	26-04 Tabacales	7,2
	26-02 Dota	3,1
Sarapiquí	12-02 Cariblanco	12,0

Fuente: Gómez, 2002.

Figura 4-3. Ubicación de cuencas de estudio



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

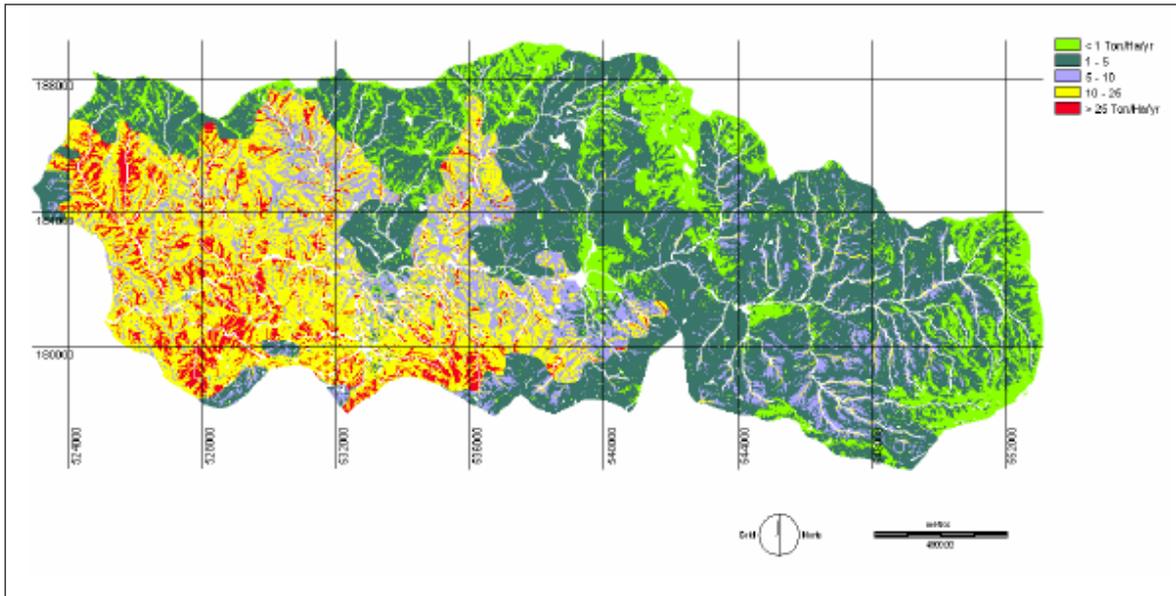
Fuente: Gómez, 2002.

Es importante destacar los valores obtenidos en la cuenca del río Reventazón, que la convierten en una de las cuencas de mayor pérdida potencial de suelo. Inclusive, se debe resaltar también que, en otros estudios mencionados por Vargas (2010), se han estimado tasas de erosión en subcuencas cercanas a 42 t/ha-año, como es el caso de la cuenca del río Pirrís, que puede considerarse como una de las producciones altas de la cuenca del Reventazón.

Por otro lado, a manera de ilustración se presenta en la Figura 4-4 el mapa de erosión estimada para la cuenca del río Pirrís, que abarca un área importante, identificada en rojo, con valores superiores a 25 t/ha-año, concordando con la zona de mayores pendientes y una alta pluviosidad, y que se ve reflejado en los valores obtenidos.

Se debe mencionar también que en esta misma cuenca del río Pirrís, se han realizado estudios a nivel de parcelas y microcuenca donde se cuantificó la erosión en áreas cultivadas de café, con sombra en algunos casos, obteniéndose una producción de hasta 1,24 t/ha en un año de estudio y un área de estudio de 0,3 km² (Villatoro, 2015). Cabe resaltar el hecho que el año en que se aplicó la medición fue un año considerado seco en el país y, por tanto, podrían esperarse producciones mayores. Esta cuenca también ha sido afectada por deslizamientos masivos, producto del efecto indirecto de los ciclones tropicales en el Caribe, lo cual incrementa la pérdida de suelos y cuya magnitud aún no ha sido establecida.

Figura 4-4. Mapa de erosión potencial cuenca Pirrís



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

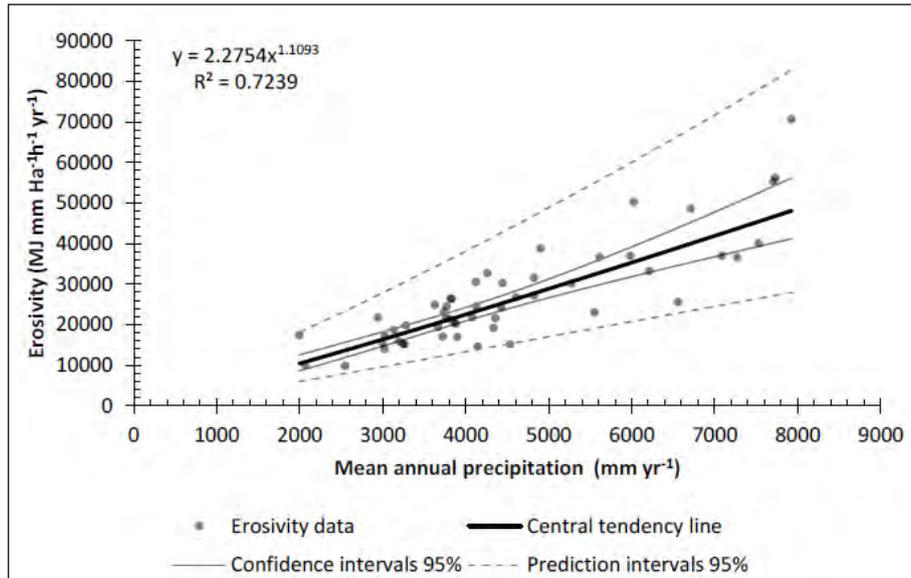
Fuente: Gómez, 2002.

4.3. Estudio de la cuenca tributaria al río San Juan

La cuenca del río San Juan es compartida por Nicaragua y Costa Rica. En el año 2015 se le encomendó al Área de Hidrología del Instituto Costarricense de Electricidad estimar la erosión y la carga de sedimentos aportada al río desde el lado costarricense. Para este caso, y debido a las diferentes aplicaciones que ya se habían realizado en el país, se decidió utilizar la USLE para obtener el estimado de erosión potencial.

La cuenca del San Juan es un sistema de 40.500 km² de extensión y el área de estudio corresponde a 11.474 km². Como dato particular, se resalta que se empleó el registro de 52 estaciones meteorológicas, de las cuales se obtuvieron 63.810 tormentas para derivar el factor de erosividad, de acuerdo con la metodología del índice EI30 (Wischmeier y Smith, 1960). De acuerdo con Leitón (2015), dada la falta de cobertura en algunas zonas, se estableció una relación empírica de R, en función de la precipitación media anual, la que se presenta gráficamente en la Figura 4.5 Una vez rasterizado el factor R, se aplicó la USLE para, finalmente, obtener el potencial de erosión de la zona de estudio. El resultado se presenta en la Figura 4-6, en la que se puede observar el rango de variación de la erosión potencial. Se aprecia claramente una zona donde los valores superan las 50 t/ha-año y que corresponde precisamente al sector montañoso del área de estudio. Se puede observar también que es donde se ha evidenciado el mayor potencial erosivo de los estudios presentados en el presente documento.

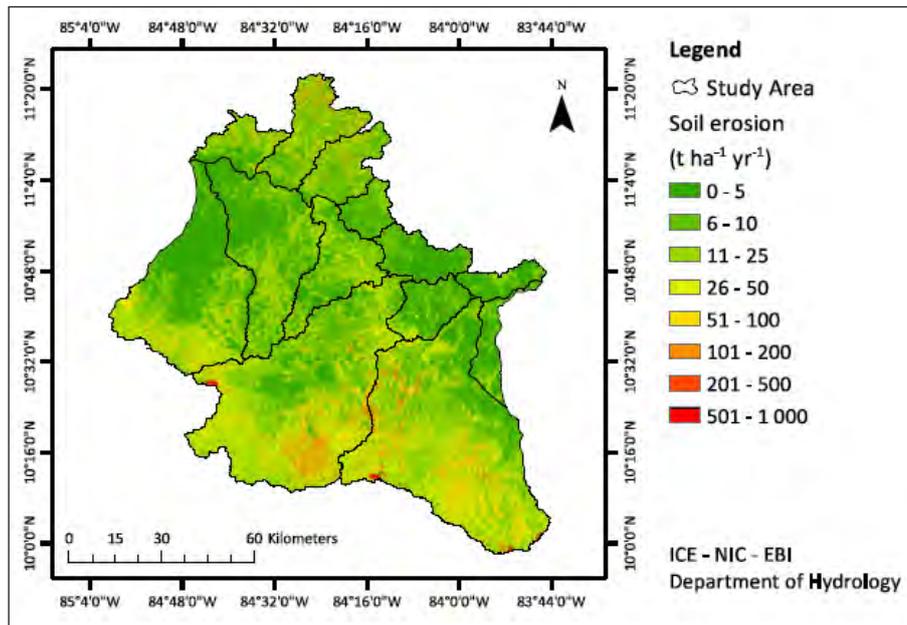
Figura 4-5. Factor R como función de la precipitación media anual



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Leitón, 2015.

Figura 4-6. Erosión potencial en el área de estudio



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Leitón, 2015.

4.4. Conclusiones

El país presenta un alto potencial de erosión en algunos sectores de las cuencas analizadas. En este artículo se ha evidenciado principalmente la condición de algunas cuencas tributarias a embalses y que muestran pérdidas con magnitudes máximas de 45 t/ha-año y mínima de 3,1 t/ha-año. Se realizó un estudio contrastante para la cuenca del río San Juan, donde se observan máximos de 500 t/ha-año.

El área cubierta por los estudios indicados no supera el 35% de la superficie del país, lo que significa una oportunidad para continuar con las investigaciones, tanto para actualizar como para incursionar en otras cuencas del país.

Por otro lado, se ha evidenciado que hay una pérdida importante de suelos en todos los casos revisados, y el impacto socioeconómico que esto implica debe evaluarse, así como el impacto en los sistemas de generación hidroeléctrica.

Costa Rica cuenta con una ley de suelos que debe revisarse y aplicarse rigurosamente para procurar reducir lo máximo posible la pérdida de suelos.

4.5. Referencias bibliográficas

Aylward, B. A.; Tognetti, S. S. (2002). "Land-water linkages in rural watersheds. Case study series. Valuation of hydrological externalities of land use change: Lake Arenal case study, Costa Rica. Valoración de las externalidades hidrológicas del cambio de uso de la tierra: Estudio de caso del Lago Arenal, Costa Rica", *Case study series FAO*.

Campos-Vargas, C. A. (2010). Análisis de los cambios de cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, periodo 2000-2010. Tesis Ingeniería Forestal. Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 68 p.

Gómez, Federico (2002). *Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica*. Área de Hidrología, ICE. San José, Costa Rica.

Gómez, Federico (2004). *Distribución de la erosión potencial y la producción de sedimentos en la cuenca definida por el PH Peñas Blancas*. Área de Hidrología, ICE. San José, Costa Rica.

Leitón, J.; Jiménez, D. (2015). *Second report on hydrology and sediments for the Costa Rican river basins draining to the San Juan River*. Área de Hidrología, ICE. San José, Costa Rica.

Vahrson, W. G. (1990). "El potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica". *Agronomía costarricense*, 14(1), 15-24.

Vargas Cabezas, F. (2010). Estimación de pérdida de carbono en el suelo por erosión hídrica laminar bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera en la subcuenca del río Birris, Costa Rica (No. Thesis V297ei). CATIE, Turrialba (Costa Rica).

Villatoro, M. (2015). "Evaluation et modélisation de l'érosion du sol sous différentes pratiques de conservation sur les plantations de café ombragées sur les terres de pente (Ultisols) au Costa Rica" (Doctoral dissertation, Montpellier, SupAgro).

Wischmeier, W. H; Smith, D. D. (1960). "An Universal Soil Loss Estimating Equation to Guide Conservation Farm Planning". 7th International Congress of Soil Sciences, 418-425.

Perspectivas del estado de los sedimentos en Cuba

Orlando R. Laiz Averhoff (orla.laiz.46@gmail.com), **Teresa Fraser** (investigaciones3@isuelos.cu), **Ernesto Flores Valdés**¹ (eflores@hidraulicos.cu), **Luis Ernesto Batista González**¹ (boro@eiphh.hidro.cu), **Andrés Portal Casanova**¹ (andresportalcasanova@gmail.com)

5.1. Introducción

El ser humano ha realizado en el ambiente modificaciones muy significativas en las últimas décadas y, entre las principales, se incluyen la construcción de embalses. Estos se han explotado al margen de sus peculiaridades y su evolución. A pesar de que se conoce que los procesos como la eutrofización y la acumulación de sedimentos afectan la vida y el volumen útil de los embalses, lo cierto es que en pocas ocasiones se aplican criterios ecológicos en la gestión y manejo de los mismos.

Los embalses desempeñan un papel importante para la sociedad en campos como control de avenidas, suministro de agua, generación de energía hidroeléctrica, riego, mejora de la navegación, recreo, acuicultura, etc. Con el paso del tiempo, en muchos embalses, cuyas cuencas hidrográficas posibilitan que se arrastren grandes volúmenes de sedimentos, se ha observado una cierta reducción de su capacidad de almacenamiento debido a la sedimentación.

Las estimaciones de la pérdida de capacidad de almacenaje en un embalse, por sedimentación, es una de las problemáticas que se ha tenido en cuenta al momento de realizar la evaluación de los volúmenes de sus reservas de agua para su explotación. Es por ello que, hoy en día, internacionalmente se realizan evaluaciones sistemáticas de los volúmenes de azolvamiento del vaso de los embalses, mediante mediciones batimétricas que posibilitan realizar estos cálculos. De acuerdo con el nivel tecnológico de estas determinaciones se pueden alcanzar certidumbres desde un 90 hasta un 100%. Con una ecosonda de última generación pueden valorarse embalses en un corto periodo de tiempo, con una certidumbre de hasta el 100%.

La colmatación por sedimentos de un embalse y, por ende, la pérdida de capacidad de almacenaje de agua es un proceso complejo que depende de multitud de factores, entre los que cabe citar: el tamaño y textura de las partículas de sedimento, las variaciones estacionales que existen en el cauce del río que fluye al embalse, la superficie de la cuenca que vierte al embalse, el tamaño y la forma del embalse y el manejo que se haga del mismo. Por último, como aspecto de gran importancia, caben destacar los aportes residuales dispuestos en estado crudo o con tratamientos incompletos (DGMN-Andalucía, 2002), aunque también pueden existir aportes desde la cobertura vegetal presente en los suelos de la cuenca hidrográfica tributaria. Por ello, los principales datos que se pueden manejar para conocer el estado real de los embalses son los procedentes de batimetrías realizadas anualmente.

La humanidad en su desarrollo como especie ha tenido que adaptarse al medio en que habita y aprender a modificarlo en su beneficio. La construcción de obras hidro-técnicas, tales como acueductos, canales de riego y embalses para el control y uso de las aguas, proveen del recurso necesario para el incremento de la productividad agrícola, industrial y poblacional.

Desde que se realiza el cierre de una red fluvial para la construcción de una presa, comienza la acumulación de sedimentos en el fondo del futuro embalse, y se extiende durante toda la vida del mismo. La presencia en la cuenca hidrográfica de diferentes litologías y estructuras geológicas son fuente de una gran variedad de sedimentos transportados por las aguas superficiales que son depositadas en el cuerpo del embalse.

La exactitud de los datos, lograda a partir de mediciones en tiempo real, es esencial para todos los aspectos de la gestión del conocimiento de la sedimentación y su influencia en el resultado final, referido a la pérdida de capacidad en embalses, empleando medios informáticos actualizados,

modelación matemática y otros que en la actualidad posibilitan una mayor exactitud en los resultados finales.

5.2. Revisión bibliográfica

Borland & Miller (1958, 1960) abordaron para el mundo, el tema de la sedimentación en los embalses y sus efectos sobre los procesos fluviales, el cual ha sido objeto de análisis más detallado a partir de la década del 50 con el desarrollo de los procesos tecnológicos, aunque con anterioridad muchos investigadores dedicaron gran parte de su vida a estos estudios. Churchill (1948), Brown (1950), Brune (1953) y Borland & Miller (1958) estudiaron los procesos de deposición, así como examinaron los métodos, tanto empíricos como numéricos, de estimación de esta deposición a largo plazo en los embalses. Asimismo, abordaron la gestión de los embalses haciendo hincapié en la posibilidad de preservar su capacidad para su uso en el futuro y, con el estudio de casos reales, mostraron los problemas relacionados con la sedimentación en los embalses.

Las preocupaciones ecológicas y ambientales inciden en el desarrollo sostenible de las sociedades humanas en todo el mundo. Esas últimas examinan los efectos para la ecología y el medio ambiente de la erosión de los suelos y de la sedimentación en ríos y embalses, así como los posibles beneficios de los sedimentos aprovechados como recursos reutilizables (Xiaoqing 2003).

El problema de la sedimentación en los vasos de los embalses y sus soluciones están estrechamente ligados con la erosión en la cuenca hidrográfica tributaria, pues básicamente todo el sedimento transportado por las corrientes al embalse es aportado por la pérdida de suelos (Shen, 1976; González, 2005).

La acción antrópica influye en el grado de contaminación de las aguas. Esta situación cobra, cada día, mayor importancia tanto en países desarrollados como subdesarrollados. La calidad de las aguas está vinculada, además, a las sustancias que se disuelven en ella, al transporte de sedimentos y a otros materiales tóxicos. De esta forma el ser humano continúa incrementando y afectando el nivel de eutrofización de las aguas llamadas dulces o continentales, aunque en los últimos tiempos estas afectaciones ya se observan en los ambientes costeros.

En el proceso de acumulación de sedimento se presentan una serie de factores causales (Bureau of Reclamation, 1987) para su ocurrencia, destacándose los siguientes:

- Composición litológica de las formaciones geológicas en el área que ocupa la cuenca hidrográfica;
- Características morfológicas de la cuenca superficial tributaria al embalse, tales como, pendiente, densidad de red fluvial, etc.;
- Uso de la tierra;
- Tipo y extensión de la vegetación natural (cobertura vegetal), que la preserva de la erosión;
- Régimen de lluvia que inciden en la región;
- Intervención antrópica en la cuenca hidrográfica;
- Nivel trófico del ecosistema acuático;
- Manejo de las aguas embalsadas.

Cuando se construye una presa atravesando un río para formar un embalse, la velocidad del flujo entrante al mismo es reducida o prácticamente eliminada. La mayor parte de todo el sedimento en suspensión se deposita en el embalse (Brune, 1953).

En conclusión, el relleno del embalse es inevitable y deberá tomarse en cuenta dicha variable en el diseño, planificación y operación de proyectos, que es el objetivo de análisis del presente trabajo.

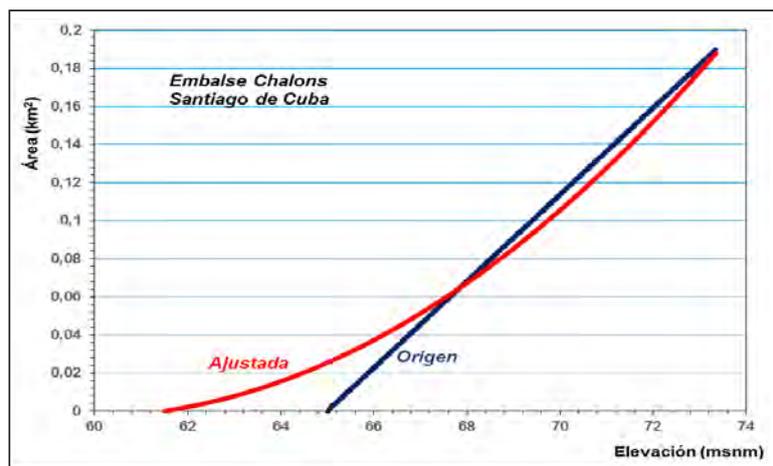
5.3. Métodos

Para la sedimentación se obtendrán proyecciones y gráficos en los cuales se reflejará el estado del embalse; el método a utilizar será directo, el cual consiste en comparaciones de perfiles transversales y longitudinales arrojados de la batimetría y chequeando la reducción de áreas que ha sufrido el embalse. Se crearán modelos que ayudarán a determinar el tiempo de vida útil, así como predicciones de sedimentación para años venideros.

En esta metodología se realiza un levantamiento batimétrico del vaso, es decir, se tiene también en cuenta los principales accidentes topográficos (islas, bahías, penínsulas, etc.). Esto lleva a que se navegue por todo el embalse con una importante densificación de puntos, determinándose las características reales del reservorio, ya que se obtendrán coordenadas (x, y, z) de un número suficiente de puntos del vaso del embalse. Para aquellos puntos que no se obtengan de la batimetría, se hará uso de estación total para obtenerlos.

La batimetría ayudará también a determinar la cubicación del embalse, esto reflejará la cantidad de agua que tiene a diferentes cotas. Debido a la sedimentación, este irá decreciendo año tras año. Luego de realizar la cubicación se encontrará el volumen muerto y útil del embalse, para actualizar la curva elevación-área-volumen, la cual es una gráfica en la que se refleja la cantidad de agua almacenada y el área que ocupa este embalse en particular (ver Figura 5-1).

Figura 5-1. Curvas típicas de Área VS Elevación del embalse Chalons, provincia Santiago de Cuba (106 años)



Fuente: Laiz, 2018.

Además, se trazan trayectorias de perfiles transversales y longitudinales, navegándolos para que, al realizar el proceso de cálculo de las curvas de nivel y realización del modelo digital del terreno, estos conserven la información obtenida *in situ* en los perfiles.

La tarea consiste entonces en una densificación de mediciones en el cuerpo principal del embalse, pero también en las márgenes y puntos intermedios destacables. Se aumenta el número de perfiles con trayectorias transversales y longitudinales, que permiten medir con un mayor detalle el cuerpo principal del embalse. La densificación del relevamiento representa a veces un itinerario en forma de espiral, a modo de lograr una grilla que permite la interpolación precisa de los datos obtenidos. Adicionalmente, se realiza un relevamiento con mayor detalle en las proximidades de la presa.

El instrumental utilizado está compuesto por una embarcación que lleva montada una ecosonda de registro digital y un GPS geodésico. El sistema se completa con otro GPS geodésico ubicado fuera del embalse.

El método de relevamiento se realiza mediante determinaciones ecográficas digitales de la profundidad y la asociación del posicionamiento satelital con el equipamiento descrito con

anterioridad. Los puntos batimétricos son leídos manteniendo una velocidad entre 6 y 8 km/h. A su vez, con una estación total y GPS diferencial, se extiende el levantamiento por sobre el nivel del agua y hasta la cota de máximo embalse.

Se adopta una curva de nivel como condición de contorno, utilizando para ello los planos originales del embalse. Con estos registros digitalizados se utilizan actualmente los siguientes programas: Autocad, TopoCalc, hoja de cálculo y de sistema de información geográfico.

A partir de estos registros digitalizados y de los programas señalados, se elaboran los perfiles y mapas de curvas de nivel referenciados, mediante un sistema de coordenadas apropiado.

5.3.1. Ecosonda

Se basa en la tecnología del sonar que, a su vez, se basa en ondas de sonido que permiten localizar y definir estructuras, constitución y relieve del fondo y profundidad bajo el sensor. Este envía y recibe señales sonoras y define la distancia a determinado punto midiendo el tiempo que tardan en rebotar (señales de ecos) y, a través de esta reflexión, interpreta ubicación, tamaño y composición de cada objeto que localiza.

Son importantes características las que se destacan a continuación:

- Selección de fase y rango: manual y automático.
- Frecuencias: 38 KHz y 200 KHz.
- Resolución: 1 cm por cada 100 m de profundidad.
- Resolución: 1 cm para velocidades de 1300 a 1700 m/s.
- Resolución: 1 cm para calado entre 0 m a 100 m.
- Interfase de 12 Mbps por medio de USB.

5.3.2. Estación total

Se denomina estación total a un aparato electro-óptico utilizado en topografía, cuyo funcionamiento se apoya en la tecnología electrónica. Consiste en la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador a un teodolito electrónico. Algunas características importantes son:

- Pantalla alfanumérica de cristal líquido (LCD)
- Luces LED de avisos
- Iluminación independiente de la luz solar
- Calculadora

Una de las grandes ventajas que ofrece este aparato es que maneja un programa que consiste en la introducción de datos angulares en formatos de azimuth, rumbos, coordenadas rectangulares y coordenadas UTM (para este trabajo fue necesario trabajar en coordenadas UTM). Se le introdujeron las coordenadas de cada perfil, y debido a que los monumentos se encuentran fuera del agua, se recurrió a este aparato de medición.

5.4. Síntesis de resultados

El archipiélago cubano posee un clima tropical húmedo, las cuencas hidrográficas (74% del total) en su mayoría poseen un área equivalente aproximada a 100 km² o menor y las pendientes de los ríos son variables (entre 8-30°). Los embalses construidos se encuentran en diferentes zonas

morfológica, llanas, pie de montes y, algunos de ellos en regiones netamente montañosas, por lo que como parte importante de los resultados que se describen en el estudio, es lo concerniente a las tasas de sedimentación.

Se han realizado algunos intentos de evaluación de los volúmenes de sedimentación, fundamentalmente en embalses (Ramírez y de León, 1981), aunque estos autores también elaboraron una metodología para el estudio batimétrico en embalses. El uso de estas mediciones mediante el empleo de un sondeo acústico fue referido por Batista (1976), cuando señala que sería conveniente realizar algunos levantamientos de los volúmenes sedimentados en los embalses, empleando equipos automáticos de sondeo acústico, con el fin de determinar el azolvamiento para un periodo largo de tiempo. Con este objetivo, Laíz y col. (2006) determinaron mediante mediciones batimétricas la pérdida de capacidad de almacenaje de agua en el embalse Bacuranao y Laíz y Flores (2007). Aplicando las mismas técnicas, obtuvieron resultados en la laguna El Pesquero, determinando igualmente el volumen disponible para el uso en este acuatorio.

Los sedimentos, una vez que penetran en los embalses, se depositan, producto de la pérdida de velocidad del flujo de agua, reduciendo la capacidad de almacenaje y disminuyendo su vida útil en el futuro. Las intensas lluvias asociadas con los huracanes, las perturbaciones tropicales que han incidido en la región del Caribe, la incidencia antrópica (agricultura, asentamiento poblacional), las pendientes, la geología imperante y los tipos de suelos en la cuenca hidrográfica de los embalses, causan la erosión de los suelos ocasionando que el sedimento se transporte rápidamente hasta los embalses.

Las características físico-geográficas de la cuenca que tributa al embalse determinan la variedad, tipo y cantidad de sedimentos que se acumulan en su vaso. Durante el estudio realizado en Cuba de la batimetría a 18 embalses, distribuidos en todo el territorio nacional, se trató de que los mismos estuvieran enclavados en regiones de diversas constituciones geológicas y posición altimétrica.

Existen en la actualidad modelos matemáticos como el modelo hidrológico SWAT (“Soil and Water Assessment Tool”, desarrollado por investigadores del “Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agriculture Research Service, USDA”) el cual fue aplicado en la cuenca del Río Nizao en la República Dominicana, que servirá entre otros aspectos para la estimación de la sedimentación en embalses (Camacho *et al.* 2003).

Periodo 2006-2014:

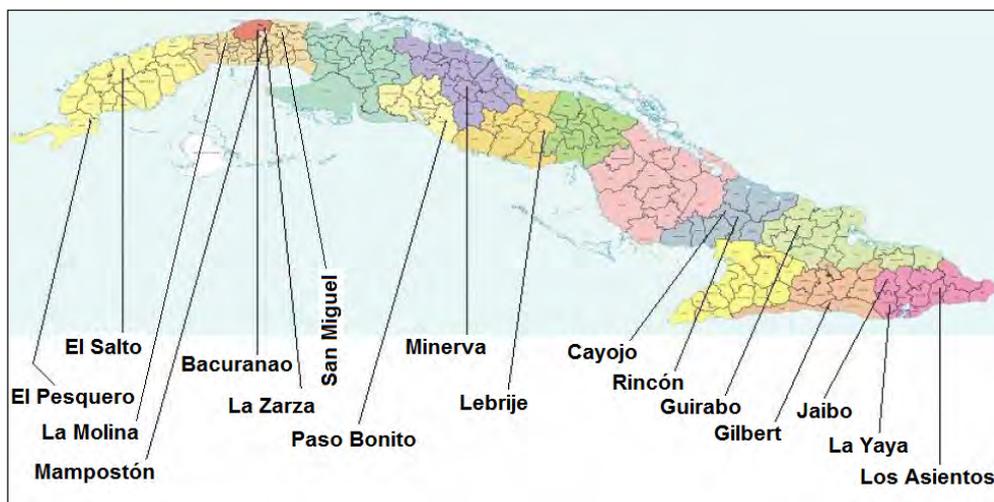
Los estudios de sedimentación en embalses cubanos se reiniciaron en el año 2004 en el extinto Centro de Hidrología y Calidad de Las Aguas (*CENHICA*), continuando posteriormente en el 2006 hasta el 2014, en la UEB de Investigaciones Aplicadas, de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Las Habana (*EIPHH*), analizándose un total de 18 embalses, utilizados para abasto y riego. Estos se localizan en las provincias de Guantánamo (*La Yaya, Jaibo y Los Asientos*), Santiago de Cuba (*Gilbert*), Holguín (*Güirabo*), Las Tunas (*Cayojo y El Rincón*), Sancti Spiritus (*Lebrije*), Villa Clara (*Minerva*), Cienfuegos (*Paso Bonito*), Mayabeque (*Mampostón, San Miguel*), Ciudad Habana (*Bacuranao y La Zarza*), Artemisa (*La Molina*) y Pinar del Río (*El Pesquero y El Salto*), ver Figura 5-2.

Estos embalses, enclavados en regiones de diversas constituciones geológicas y diferente posición altimétrica, se encuentran dispersos en la región Occidental (*La Molina, Pesquero, El Salto, Bacuranao, Zarza, San Miguel y Mampostón*), en la región Central (*Paso Bonito, Minerva y Lebrije*) y en la región Oriental (*Cayojo, Rincón, Güirabo, Gilbert, Yaya, Jaibo y Los Asientos*) y representan diferentes características morfo-estructurales como: relieve de llanura (*Pesquero, Bacuranao, San Miguel y Rincón*), pie de monte (*Minerva, Zarza, Cayojo y Güirabo*), montañas bajas (*El Salto, Mampostón, Paso Bonito, Lebrije y La Yaya*) y montañas medias (*Gilbert, Jaibo y Los Asientos*).

Estos embalses se construyeron en el periodo comprendido entre 1967-1990 y la acumulación del sedimento en ellos ha reducido su capacidad original de almacenaje. La Empresa de Investigaciones

y Proyectos Hidráulicos Habana (EIPHH) ha estado realizando estudios de pérdida de capacidad de almacenamiento utilizando un sistema de posicionamiento global (GPS) y un sistema de información geográficos (GIS) y otros sistemas informáticos. Se compararon los resultados con los proyectos originales para cuantificar la pérdida de capacidad de almacenaje.

Figura 5-2. Localización de los embalses estudiados para determinar la sedimentación producida desde su construcción. Se encuentra en municipios y provincias



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Laiz y Flores, 2014.

El resultado final de los estudios de sedimentación realizados entre 2006 y 2014 se observan en la Tabla 5-1. De la tabla se concluye que la pérdida de capacidad de almacenaje para estos embalses estuvo en el rango entre 3,98 a 37,75%, mientras que su promedio fue del 21,2% y el rango de la pérdida anual fue de 0,117-2,209¹% con un promedio de 0,697%. Se identificaron, además, la pérdida promedio en el volumen útil tanto total 18,1% como anual 0,603%. La tasa de pérdida de capacidad producto de la sedimentación en los embalses estudiados se calculó en el rango de 460 a 4.009 m³ km⁻² año⁻¹. El promedio de años de construidos los embalses es de 32 con un rango entre 18 y 41 años de uso (Tabla 5-1).

En la Tabla 5-2 se presenta de modo general los parámetros morfométricos de mayor importancia para los 18 embalses objeto de estudio, entre los que se destacan los niveles de aguas normales o de operación, el año que inició el llenado de cada uno de ellos, su edad, y un conjunto de parámetros ecológicos necesarios por su importancia. Se destacan entre otros la cantidad en material sedimentado que se espera en forma estimada en metros (m).

¹ Los resultados del embalse La Molina no fueron promediados, producto que el embalse recibe el agua de lavado de la arenera lo cual implica que exista gran cantidad de este material que llega a su vaso.

Tabla 5-1. Resultado de los estudios de sedimentación realizado en 18 embalses, localizados en 11 provincias

Embalse	Provincia	Año Construcción	Año Estudio	Edad (años)	Capacidad Original (hm³)	Capacidad Actual (hm³)	Pérdida Capacidad (hm³)	Pérdida Vol-Total (%)	Pérdida Anual Vol-Total (%)	Pérdida Vol-Útil (%)	Pérdida Anual Vol-Útil (%)
Bacuranao	La Habana	1971	2006	35	15,710	14,060	1,650	10,50	0,300	10,20	0,291
El Pesquero	Pinar del Río	1968	2007	39	27,609	22,870	4,739	17,16	0,440	18,00	0,462
Paso Bonito	Cienfuegos	1974	2007	33	8,000	4,980	3,020	37,75	1,144	24,20	0,733
La Zarza	La Habana	1971	2008	37	17,200	14,020	3,180	18,49	0,500	15,70	0,424
Minerva	Villa Clara	1971	2008	37	123,000	86,800	36,200	29,43	0,795	28,00	0,757
Lebrije	Sancti Spiritus	1970	2008	38	82,392	53,570	28,822	34,98	0,921	32,40	0,853
Güirabo	Holguín	1969	2008	39	15,200	13,510	1,690	11,12	0,285	7,10	0,182
Gilbert	Santiago de Cuba	1967	2008	41	59,670	41,260	18,410	30,85	0,753	25,00	0,610
La Yaya	Guantánamo	1975	2008	33	160,000	125,990	34,010	21,26	0,644	15,40	0,467
Jaibo	Guantánamo	1979	2008	29	120,000	97,150	22,850	19,04	0,657	13,20	0,455
El Salto	Pinar del Río	1980	2009	29	66,000	59,260	6,740	10,21	0,352	7,00	0,241
Mampostón	Mayabeque	1978	2009	31	153,800	118,700	35,100	22,82	0,736	21,60	0,697
Cayojo	Las Tunas	1980	2009	29	13,650	11,920	1,730	12,67	0,437	12,30	0,424
El Rincón	Las Tunas	1990	2009	19	21,400	19,340	2,060	9,63	0,507	9,00	0,474
Los Asientos	Guantánamo	1991	2009	18	17,562	14,360	3,202	18,23	1,013	15,40	0,856
Bucaranao	La Habana	1971	2011	40	15,710	13,610	2,100	13,37	0,334	12,70	0,318
La Molina (*)	Artemisa	1989	2011	22	0,677	0,348	0,329	48,60	2,209	48,60	2,209
San Miguel	Mayabeque	1978	2012	34	15,496	14,880	0,616	3,98	0,117	2,90	0,085
PROMEDIO				32			12,0	21,2	0,697	18,1	0,603

Fuente: Laiz y Flores, 2014.

Tabla 5-2. Parámetros Morfométricos de los embalses objeto de estudio años 2006 - 2014 localizados en 11 provincias

Embalse	UM	Bacuranao	El Pesquero	Paso Bonito	La Zarza	Minerva	Lebrije	Güirabo	Gilbert	La Yaya	Jaibo	El Salto	Mampostón	Cayojo	Rincón	Los Asientos	La Molina	San Miguel
Uso	-	Abasto	Abasto	Abasto	Abasto	Riego y Abasto	Riego y Abasto	Abasto	Abasto	Abasto y Riego	Riego	Riego	Riego	Abasto, Riego	Abasto	Riego y Energía	Lavado Cantera	Abasto y Riego
Coordenadas-N	-	374100	183400	587400	362500	289800	245000	243200	164160	164400	172150	308700	347300	254540	246180	168900	326976	364838
Coordenadas-E	hm²	365200	260000	256200	382100	624040	689600	553700	579150	654300	662150	226100	389600	474200	493110	713300	327291	393129
Volumen operación (NAN)	hm³	15,71	27,609	8,00	17,200	123	82,392	15,2	59,67	160	120	66	153,8	13,65	21,4	17,5	0,677	14
Área Operación (NAN)	km²	2,79	9,76	1,25	2,39	18	9,072	4,25	6	13,3	11,2	13,75	16,37	4,16	6,35	1,3	0,181	2,57
Volumen-Mínimo	hm³	0,49	0	1,68	0,69	5	3,33	0,8	5	14	23,6	4	5,2	0,65	0,3	0,5	0,1	0,2
Volumen-Útil	hm³	15,22	27,609	6,32	16,51	118	79,06	14,4	54,67	146	96,4	62	148,6	13	21,1	17	0,577	13,8
Altitud-Operación /NAM	ms nm	35,37	5,5	84,5	50,40	82	100	100	194	79,1	111	158	132,64	71,5	65	173,3	45	42,5
Elevación Cauce	ms nm	17,5	0,	65	26,00	52	71	85,8	154,5	38,5	67,5	141	100,08	56,2	52	137	34	20,14
Nivel de Azolve Esperado	m	6,5	-	11,5	9,00	14,5	11	7,2	15,5	20	29,25	8	13,92	3,5	4,5	12	6,3	6,36
Año	año	1971	1968	1974	1971	1971	1970	1969	1967	1975	1979	1980	1978	1980	1990	1991	1990	1978
Años Explotación	años	35	38	32	35	37	38	39	41	33	29	29	31	29	19	18	22	34
Profundidad Máxima	m	17,5	5,5	19,5	24,4	30	29	14,2	39,5	40,6	43,5	17	32,56	15,3	13	36,3	11	22,36
Profundidad Mínima	m	5,60	2,80	6,40	7,20	6,8	9,1	3,58	9,95	12,03	10,7	4,8	9,4	3,30	3,4	13,5	3,74	5,45
Profundidad Relativa	%	0,93	0,16	1,55	1,40	0,63	0,85	0,61	1,43	0,99	1,15	0,41	0,71	0,66	0,46	2,82	2,29	1,24
P-Media:P-Máxima	-	0,32	0,51	0,33	0,29	0,23	0,31	0,25	0,25	0,30	0,25	0,28	0,29	0,22	0,26	0,37	0,34	0,24
Área-Cuenca	km²	32	55,7	65,9	31,1	313	216	94,3	144	555	220	71,3	49,8	80,3	123	73,5	20	34,2
Escorrentamiento Medio Anual	hm³	6,57	-	37,6	7,45	111,7	89,6	20,8	67,5	183	67,5	58,3	25,1	18,214	22,17	34,5	5,67	15,8
Área-NAN:Área-Cuenca	-	0,09	0,18	0,02	0,08	0,06	0,04	0,05	0,04	0,02	0,05	0,19	0,33	0,05	0,05	0,02	0,01	0,08
Afluentes		Río Bacuranao	Río Cuyaguatete	Túnel Hanabanilla, Río Hanabanilla y Ar. Navarro	Ar. Matadero	Río Sagua la Chica y Ar. Manajayabo	Río Jatibonico del Sur	Río Matamor y Yareyal	Río Cauto	Río Guantánamo	Río Jaibo	Río Hondo	Ar La Luz	Río Cayojo	Río Palmitas y Potrero	Río Gabanalamar	Río Mosquito	Río San Miguel

NAN= Nivel de Aguas Normales o de Operación.

Fuente: Laiz y Flores, 2014.

5.5. Principales usos que se les dan a los sedimentos depositados en las represas

Entre los años 2010-2014 el grupo de trabajo cubano llevó a cabo pruebas en embalses que, por su cercanía, permitían obtener muestras de sedimentos para determinar un posible uso. Esto fue ejecutado en 4 embalses: Bacuranao, La Zarza, Ejercito Rebelde (provincia La Habana) y Mampostón (provincia Mayabeque).

Se ensayaron, bajo condiciones controladas en el Instituto de Suelos, los siguientes tratamientos: Testigo (100% de suelo), 50% de azolve + 50% de suelo y 25% de azolve + 75% de suelo y como cultivos indicadores se emplearon 4 especies de hortalizas (lechuga, pepino, acelga y habichuela), estableciendo el nivel de comparación entre los distintos tipos de sedimentos. Hubo un efecto positivo en la aplicación de los diferentes azolves como sustrato con relación al testigo, apreciándose que con el 50% del azolve + 50% de suelo se obtuvieron los mayores pesos, destacándose las presas Ejército Rebelde y Bacuranao.

En el segundo estudio se procedió a la preparación de los azolves para su prueba como sustrato combinada con compost y zeolita, en proporción de: 50% de azolve +50% de compost, 40% de azolve +10% de zeolita + 50% de compost, 50% de suelo + 50% de compost, en este caso se utilizó la acelga como cultivo indicador teniendo en cuenta los rendimientos.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, destacándose la presa Ejército Rebelde con el tratamiento de 40% de azolve +10% de zeolita + 50% de compost con la que se obtuvo los mayores rendimientos. Se debe destacar que los rendimientos del resto de las presas fueron superiores al obtenido con el testigo (50% de suelo + 50 % de compost), lo que nos indica que es factible el uso de los sedimentos de los embalses como sustrato en los organopónicos. Durante el año 2012 se hicieron las coordinaciones necesarias con el organopónico situado en las cercanías del Central Martínez Prieto antiguo Central Toledo, para ensayar el cultivo de estación utilizando un área con las condiciones de producción utilizadas por este centro productivo. El cultivo utilizado fue la cebolla y la col china.

Las tablas 5-3, 5-4, 5-5 y 5-6 muestran los resultados obtenidos en los diferentes cultivos realizados. Una de las observaciones principales en este aspecto fue la necesidad de determinar el contenido de metales pesados tóxicos en los frutos, los cuales no fue posible realizar debido a que no fue posible localizar en tiempo a la entidad que realiza este tipo de análisis en el territorio cubano.

El sedimento fue utilizado como sustrato, el cual es todo material sólido distinto del suelo, natural o de síntesis, mineral y orgánico que, colocado en un contenedor, cantero o cama, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular y puede o no intervenir en la nutrición vegetal (ACTAF e INIFAT, 2007).

La caracterización de los sedimentos de los diferentes embalses (Tabla 5-1) mostró diferencias en las características químicas, debido a que los embalses son grandes trampas de sedimentos que retienen la mayor parte de los materiales transportados por el río. La creciente degradación de los suelos como consecuencia de la erosión origina no solo pérdida de fertilidad en los terrenos, sino también, perjuicios de importancia en las obras hidráulicas que se sitúan aguas abajo (DGMN-Andalucía 2002).

En los embalses con problemas de eutrofización en sus aguas, los sedimentos juegan un papel destacado pues actúan como sumidero neto para nutrientes (Ryding y Rast, 1992). Asimismo, a partir de la naturaleza del sedimento se pueden discriminar en algunos casos las principales áreas de estos materiales en los embalses, lo que permitiría emprender en puntos concretos de la cuenca medidas encaminadas a actuar para el control de la erosión (Sanz *et al.*, 1998).

El uso de los sedimentos de los embalses como sustratos o mejoradores de los suelos no ha sido muy estudiado, por lo que no se dispone de información suficiente. No obstante, Fonseca (2003) empleó sedimentos con suelo artificial mezclados proporcionalmente con el cultivo del ají y

se comparó con un suelo de fertilidad normal. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en este estudio, donde los mayores rendimientos se obtuvieron con los tratamientos con los azolves difiriendo del testigo, quedando demostrado la eficacia de los sedimentos para ser usados como sustrato para los cultivos de organopónicos.

En las muestras el contenido de humedad dificulta su preparación y el contenido de arcilla es alto sobre todo en las presas de Mampostón, Bacuranao y Ejército Rebelde mientras que la Zarza contiene mayor cantidad de arena. Los contenidos de arcillas y arenas están en dependencia de los tipos de suelo que conforman el entorno y de la erosión de los ríos y las cuencas aledañas que traen consigo materiales diversos que se van depositando en los embalses incorporando nutrientes y contaminantes en algunos casos.

La caracterización química de los sedimentos se ejecutó con los análisis de pH del suelo y el agua, la materia orgánica, el fósforo (P_2O_5), el potasio (K_2O), el sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg) y además, se obtuvieron resultados de metales pesados tóxicos y esenciales a saber: plomo (Pb), níquel (Ni), cromo (Cr), cadmio (Cd), cobre (Cu), y zinc (Zn).

Tabla 5-3. Resultado de la Granulometría del sedimento

Embalse	% Arena	% Arcilla+Limo
Bucarano	19	81
Ejército Rebelde	6	94
La Zarza	66	34
Mampostón	18	82

Fuente: Fraser y Laiz, 2012.

Generalmente el calcio y el potasio son los de mayor concentración, el magnesio suele ser bajo, mientras que en el caso de sodio se debe monitorear para evitar problemas de modicidad. Con su aplicación, estos resultados coinciden con los reportado por Sanz *et al.* (1998) quienes plantean que la mayor parte de los sedimentos acumulados en los embalses son alóctonos y, por tanto, su composición refleja en gran medida las características geológicas de la cuenca. Entre los procesos antigénicos que tienen lugar dentro del embalse se destaca, por ser el más importante desde el punto de vista volumétrico, la precipitación de carbonato cálcico. En el caso de los metales pesados, estos valores no son altos y el cadmio se presenta como trazas; pues se encuentran dentro de los rangos permisibles, según lo reportado por Rosal y col. (2007).

Los contenidos de materia orgánica y nitrógeno en todos los embalses son bajos, aunque superiores a los conocidos para suelos fértiles en Cuba y la relación carbono-nitrógeno es apta para todos los cultivos. Al respecto Goldman (2002) plantea que la materia orgánica en descomposición en las aguas más profundas consume el oxígeno, así es que, a menudo, se agota en el hipolimnion.

Entre los metales analizados en los sedimentos se encuentran el cadmio (Cd) y el níquel (Ni), los cuales no mostraron alteración para ninguno de los embalses por el valor y referidos al contenido máximo admisible en los suelos cubanos. El cromo (Cr) tampoco tiene alteración con respecto a los valores medios en suelos cubanos. El cobre (Cu) muestra alteración con respecto al valor medio en el caso de Ejército Rebelde, aunque no con respecto al rango máximo admisible ($174,5 \text{ mg kg}^{-1}$). Para el plomo (Pb) todos los valores son superiores al valor medio para los suelos cubanos excepto el sedimento de Ejército Rebelde que, además, es superior al valor máximo admisible. Para el zinc (Zn) se detectó que la Zarza y Mampostón poseen valores inferiores al valor medio para los suelos, pero Bacuranao presenta valores medios superiores a la media para los suelos cubanos; Ejército Rebelde mostró también para este elemento un valor medio ($182,44 \text{ mg kg}^{-1}$) superior tanto al valor medio ($38,02 \text{ mg kg}^{-1}$) de los suelos cubanos como para el rango máximo admisible ($124,1 \text{ mg kg}^{-1}$).

En el primer experimento hubo un efecto positivo en la aplicación de los diferentes azolves como sustrato con relación al testigo (Tabla 5-4), apreciándose que con el 50% del azolve+50% de suelo se obtuvieron los mayores pesos, destacándose las presas Ejército Rebelde y Bacuranao.

Tabla 5-4. Rendimientos en kg.m-2 en los cultivos estudiados en la primera fase

Presas	Tratamientos	Pepino	Habichuela	Lechuga
Testigo	Suelo solamente	0,580	0,446	0,044 b
Bacuranao	25% de Azolve+75% suelo	0,695	0,510	0,056 b
	50% de Azolve+50% suelo	0,898 b	0,582 b	0,078 ab
Ejército Rebelde	25% de Azolve+75% suelo	0,928 b	0,595 b	0,109 a
	50% de Azolve+50% suelo	1,065 a	0,633 a	0,114 a
La Zarza	25% de Azolve+75% suelo	0,722	0,603 ab	0,058 b
	50% de Azolve+50% suelo	0,834	0,522	0,089 a
CV %		4,95 *	4,15 *	35,83 *
		a = nivel de significación 0,01	b = nivel de significación 0,05	

Fuente: Fraser y Laiz, 2012.

Tabla 5-5. Rendimientos en kg.m-2 en los cultivos estudiados en la segunda fase

Presas	Tratamientos	Pepino	Acelga	Habichuela	Lechuga
Testigo	50% suelo + 50% compost	0,50 c	0,19	0,54	0,464
Ejército Rebelde	50% suelo + 50% compost	1,35 ab	0,56 ab	0,69 b	0,087 b
	40% Azolve + 10% Zeolita + 50% compost	1,48 a	0,73 a	0,74 a	0,119 a
Mapostón	50% suelo + 50% compost	0,67 c	0,33	0,57	0,055 c
	40% Azolve + 10% Zeolita + 50% compost	0,83 c	0,45 bc	0,64 c	0,062 c
Bacuranao	50% suelo + 50% compost	0,67 c	0,36 bc	0,57	0,052 c
	40% Azolve + 10% Zeolita + 50% compost	0,59 c	0,43 bc	0,68 bc	0,064 c
La Zarza	50% suelo + 50% compost	0,71 c	0,27 c	0,61	0,057 c
	40% Azolve + 10% Zeolita + 50% compost	0,90 bc	0,37 bc	0,67 bc	0,064 c
CV %		41,60 *	39,25 *	4,43 *	17,53 *
		a = nivel de significación 0,01	b = nivel de significación 0,05	c = nivel de significación 0,1	

Fuente: Fraser y Laiz, 2012.

En la Tabla 5 se exponen los resultados obtenidos en la segunda fase. Los mismos fueron satisfactorios, destacándose los obtenidos en la presa Ejército Rebelde con el tratamiento de 40% de azolve +10% de zeolita + 50% de compost con la que se obtuvo los mayores rendimientos. Se debe destacar que los rendimientos del resto de los embalses fueron superiores al obtenido con el testigo (50% de suelo + 50% de compost), lo que nos indica la potencialidad de estos sedimentos como componentes de los sustratos en los organopónicos.

En esta etapa fue utilizado el organopónico “El Polo” (Figura 5-3) perteneciente a la Empresa Agropecuaria Martínez Prieto, Marianao, La Habana, Cuba, hacia el cual fueron trasladados los sedimentos que se colectaron en los cuatro embalses, para realizar pruebas a escala productiva, o sea, se utilizó el sedimento como sustrato añadiendo zeolita. En la Figura 5-4 se aprecia cómo se utilizó una de los canteros productivos del organopónico para realizar el experimento de cultivo del proyecto el cual estuvo atendido por técnicos del organopónico y uno de los miembros del proyecto por parte del Instituto de Suelos.

Figura 5-3. Organopónico “El Polo”, localizado en las cercanías de la Ciudad Universitaria “José A. Echevarría” (CUJAE)



Fuente: Fraser y Laiz, 2012.

Figura 5-4. Utilización de un cantero de cultivo para el experimento de la cebolla en el organopónico “El Polo”



Fuente: Fraser y Laiz, 2012.

Las mayores producciones se obtuvieron en Ejército Rebelde y Mampostón, 11,63 y 10,03 kg m⁻² respectivamente, en ambos casos utilizando el tratamiento de 50% sedimentos + 50% compost. En los todos los casos, la producción fue inferior cuando fue añadida la zeolita, aunque la producción en cualquiera de los tratamientos utilizados es superior al suelo utilizado como testigo, lo que indica que los nutrientes y la materia orgánica son superiores a los contenidos por el suelo.

Tabla 5-6. Rendimientos en kg/m² en los cultivos estudiados en el organopónico

Embalses	Tratamientos	Cebolla	Col china
TESTIGO	50% suelo + 50% compost	2,98 c	5,57 b
Bacuranao	50% sedimento + 50% compost	9,78 ab	9,09 ab
	40% sedimento + 10% zeolita + 40% compost	9,18 b	9,77 a
Ejército Rebelde	50% compost + 50% sedimento	11,63 a	8,52 ab
	40% sedimento + 10% zeolita + 40% compost	9,45 ab	7,95 ab
La Zarza	50% sedimento + 50% compost	9,68 ab	8,18 ab
	40% sedimento + 10% zeolita + 40% compost	8,18 b	8,41 ab
Manpostón	50% sedimento + 50% compost	10,03 ab	8,52 ab
	40% sedimento + 10% zeolita + 40% compost	8,30 b	10,34 a
CV%		17,19	2 1,10

Fuente: Fraser y Laiz, 2012.

5.6. El futuro de la investigación en torno a los sedimentos

Los sedimentos tienen una enorme importancia tanto en lagos como en embalses, debido al aporte que realizan a la columna de agua durante los procesos de oxidación – reducción que se producen en las aguas profundas, así como por la actividad biológica que se produce por los bentos y algunas especies de peces y crustáceos. No es menos cierto que los sedimentos son producto de la erosión incontrolada provocada por el actuar del ser humano, lo que se ha incrementado con el cursar de los siglos, destacándose el siglo XX en especial y el XXI, por los enormes avances tecnológicos alcanzados y la explotación de los recursos naturales con el objetivo de incrementar las producciones de todo tipo, las cuales provocan lo que hoy conocemos como *cambio climático* con sus afectaciones en cuanto a niveles altos y bajos de precipitaciones, incremento de la sequía, cambios bruscos de temperaturas, incremento de actividades sísmicas y de huracanes y elevación del nivel medio del mar, producto del derretimiento de los polos debido a la elevación de la temperaturas.

Todo lo descrito es una verdad palpable por el ser humano en todo el planeta, ahora bien, es importante comprender que hay necesidad de interactuar, no solo con el control de la erosión, lo cual disminuirá los aportes de sedimentos que llegan a lagos y embalses, sino también con el sedimento, el cual puede extraerse de acuerdo a nuevas técnicas existentes en el mundo de hoy y que permitirán garantizar un aumento del nivel de agua embalsado, obtener un producto (*sedimento*) rico en materia orgánica disponible para los cultivos, así como otros elementos: el calcio (Ca), el magnesio (Mg), el potasio (K), el fósforo (P) y el nitrógeno (N), aunque no se puede olvidar de la existencia de metales pesados tóxicos que pueden estar presentes por la actividad antrópica y que requieren de un control una vez que ya son parte de los sedimentos en un acuatorio.

También es importante diseñar investigaciones que permitan asegurar la vitalidad o ecofuncionamiento de las aguas, ya que muchos de los procesos que rigen el comportamiento ecológico del ecosistema acuático, está regido por la interacción del agua con el lecho de sedimentos que existe. La Tabla 5-7 lista algunas preguntas y respuestas solicitadas, aplicadas a la realidad cubana.

Tabla 5-7. Algunas preguntas y respuestas asociadas a los sedimentos y aplicadas a la realidad cubana

¿Qué sectores productivos generan problemas relacionados con la emisión de sedimentos?	La Agricultura y en menor medida los gobiernos a partir de la falta de tratamiento para los residuales domésticos.
¿Quiénes son los sectores más afectados por la emisión de sedimentos?	La población es la más afectada por la disminución de los volúmenes de agua para la potabilización.
¿Existen políticas efectivas que contribuyan al control de los sedimentos?	No hasta el presente
¿Cuál es la emisión total anual de sedimentos estimada en su país?	No hay estimados producto de que no hay controles de erosión efectivos y continuos.
Durante la última década, ¿la emisión de sedimentos se ha incrementado?	Por supuesto se ha incrementado, debido a que en esta última década ocurrió la mayor sequía desde el inicio del conocimiento sobre la existencia del Cambio Climático.

5.7. Agradecimientos

Queremos agradecer a la UNESCO de la región de América Latina y el Caribe y su grupo ISI por su colaboración en el ámbito metodológico y técnico, el apoyo en la participación a los diferentes eventos especializados celebrados entre 2008 y 2018, sin los cuales el grupo de trabajo cubano no podría tener acceso a la documentación desarrollada durante estos años.

5.8. Referencias bibliográficas

- ACTAF e INIFAT (2007). Manual técnico para organopónicos, huertos intensivos y organoponía semiprotegida, ISBN-959-246-030-2, 184 pp. ACTAF = Asociación Cubana de Técnicos Agrícolas y Forestales y el INIFAT = Instituto de Investigaciones Fundamentales de la agricultura Tropical.
- Batista, J. L. (1976). "Escurrimiento Sólido". *Voluntad Hidráulica* Año XIII, 37/1976: 62-66.
- Borland, W. M.; C.R. Miller (1960). "Distribution of sediment in large reservoirs". *Transactions, ASCE*, Volume 125.
- Borland, W. M.; Miller, C.R. (1958). "Distribution of sediment in large reservoirs", *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 84(2).
- Brown, C. B. (1950). Sedimentation. Engineering Hydraulics, Hunter Rouse, Ed., Proceedings of the Fourth Hydraulics Conference, Iowa Institute of Hydraulic Research.
- Brune, G. M. (1953). "Trap efficiency of reservoirs". *Transactions, American Geophysical Union*, Volume 34, Number 3:408-415.
- Bureau of Reclamation (1987). *Design of Small Dams*. Third edition, Bureau of Reclamation, United States.
- Camacho, R., J. R. Córdova y R. Pekín (2003). Montaje y Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) en la Cuenca del Río Nizao en la República Dominicana para la Evaluación de Alternativas de Manejo de Cuencas (Proyecto PROMATREC-INDRHI, Financiamiento Banco Mundial), 10 pp.
- Churchill, M. A. (1948). Discussion of "Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data" by L. C. Gottschalk, pp. 139-140, Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Denver, Colo.
- DGMN-Andalucía (2002). *Consecuencias de la Desertificación*, Dirección General del Medio Natural, Andalucía, 19 pp.
- Fonseca, R. M., F. J. A. S., Barriga and W. S. Fyfe (2003). "Dam reservoirs sediments as fertilizers and artificial soils". *Case studies from Portugal and Brazil*. 8 pp.
- Goldman, C. R. (2002). Aspectos ecológicos de las presas en el trópico, <http://www.fao.org/codrep/I8790S/I8790s00,htm#Contents>
- Gonzalez, L. A. (2005). *Pérdida de capacidad de almacenamiento en las presas, un problema latente*. Facultad de ingeniería, Costa Rica.
- Laiz, O. R. (2006). Estudio Limnológico en el embalse Paso Bonito, provincia Cienfuegos. Informe Final. Rama 1003. Contrato EIPHH #42-702-06, código: 0698-702-06.
- Laiz, O. R. (2018). Comportamiento y ajuste de las curvas de uso de los embalses de la cuenca del rio Cauto. Contrato EIPHH. Rama 1001. 25 pp.
- Laiz, O. R. y Flores, E. (2007). Estudio de Azolvamiento de la laguna El Pesquero en la provincia Pinar del Río. Estimación de los Niveles de Volúmenes de Agua y la Calidad del Agua. Código: 0138-702-07. 28 pp.
- Laiz, O. R. y Fraser, T. (2012). Caracterización y uso de sedimentos de embalses. Informa Final Proyecto de Investigación. Rama 1001-Etapa 2010-2012. Junio/2012. 128 pp.
- Laiz, O. R., E. Flores y E. Balado (2006). Estudio de Azolvamiento del embalse Bacuranao en la provincia Ciudad Habana. Estimación de los Niveles de Volúmenes de Agua y Sedimentos en el embalse. Código: 0598-702-06. 20 pp.
- Ramírez, J. y de León, G. (1981). Estudios Batimétricos en los embalses. Recomendaciones. Inst. Hidroeconomía, MICONS. 24 pp.
- Rosal, A. y col. (2007). La incidencia de los metales pesados en compost de residuos sólidos urbanos y en su uso agronómico en España, *Información Tecnológica*, 15:75-82.
- Ryding, S. O. y Rast, W. (Eds.) (1992). *El control de la eutrofización en lagos y pantanos*, UNESCO, PIRÁMIDE, 375 pp.

Sanz Montero, M. E., R, Cobo Rayán, J. L. Gómez Montaña y C. Avendaño Salas (1998). "Composición de los sedimentos acumulados en embalses españoles", *Ingeniería del Agua*, Vol. 5 Núm. 4 páginas 21-28.

Shen, H. W.; Li, R. M. (1976). "Watershed sediment yield". Chapter 21, Volume II: *Stochastic approaches to water resources*. Hsieh Wen Shen. Fort Collins, Colorado, USA.

Xiaoqing, Yang (2003). Manual on Sediment Management and Measurement. World Meteorological Organization (WMO-948) Operational Hydrology Report N.º 47. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva.

Perspectivas del estado de los sedimentos en Estados Unidos

(Compilado de García-Chevesich *et al.*, 2018)

Pablo A. García-Chevesich (pablogarciach@gmail.com), **Shannon L. Jones** (shannon.l.jones@du.edu), **J. Michael Daniels**⁴ (j.michael.daniels@du.edu), **Rodrigo Valdés-Pineda**³ (rvaldes@email.arizona.edu) y **Roberto Pizarro** (rpizarro@utalca.cl)

6.1. Introducción

La erosión de suelos es un proceso natural resultante del desprendimiento y movimiento de las partículas de suelo (sedimento) por el agua, el viento, el hielo o la gravedad. Las tierras recientemente cultivadas o desnudas son más susceptibles a la lluvia y a la erosión eólica debido a la falta de una cubierta vegetal protectora. Así, la erosión de suelos en Estados Unidos puede aumentar debido a la actividad humana y a los cambios en el uso de la tierra. Dicho incremento daña los ecosistemas naturales y representa un gasto económico considerable para el país. Además, los sedimentos en suspensión pueden afectar negativamente los ecosistemas acuáticos y a quienes habitan aguas abajo en una cuenca dada (García-Chevesich, 2015).

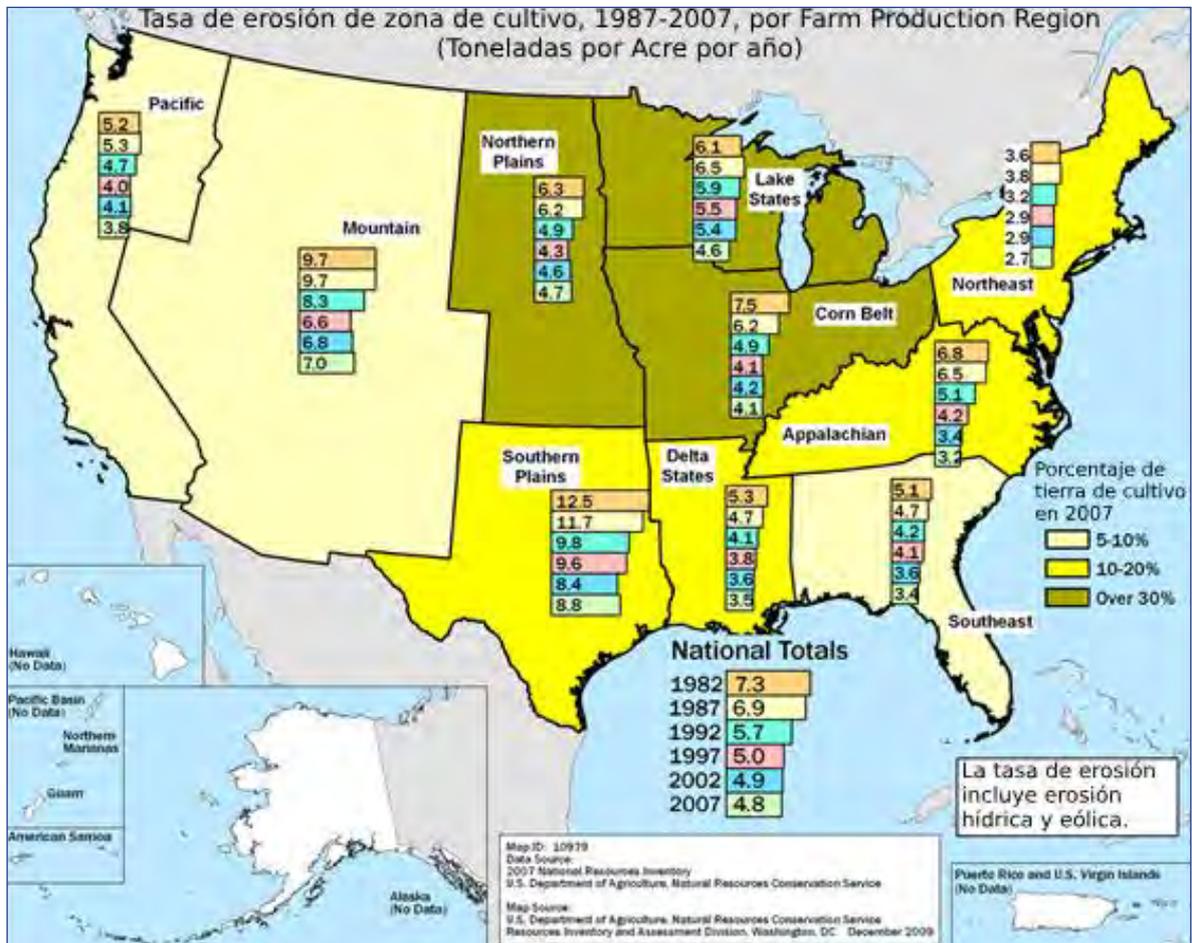
La erosión en sitios de construcción, agricultura, minería y otras actividades que despejan la capa superficial del suelo son fuentes importantes de sedimentos y contaminantes; sin una gestión adecuada, los sedimentos pueden aumentar la pérdida de suelo hasta 200 toneladas/acre-año en Estados Unidos (USDA, 2007). La principal fuente de erosión en el país son las prácticas que exponen la capa superficial del suelo a merced del viento, la lluvia y la escorrentía superficial producida durante las tormentas. Los costos asociados a la producción de sedimentos están representados por costos de fertilización e irrigación (García-Chevesich, 2015). El tratamiento del agua como tal y del aire (a raíz de la presencia de material particulado -MP10-) también es más costoso con el aumento de la sedimentación. Por ejemplo, el aumento de polvo y sedimento en el aire puede contribuir a la contaminación atmosférica en zonas urbanas y puede incrementar significativamente la frecuencia y gravedad de enfermedades respiratorias, subiendo los costos de la atención de la salud (García-Chevesich *et al.*, 2014). Las vías fluviales y los sistemas de alcantarillado obstruidos con sedimentos también deben ser continuamente dragados y filtrados, incrementando así los costos de evacuación y tratamiento de aguas urbanas.

Debido a lo anterior, en Estados Unidos existe un robusto sistema de leyes y regulaciones que demandan el control de la erosión y los sedimentos en cualquier actividad que altere la capa superficial vegetal protectora del suelo. Como consecuencia, gracias a una adecuada gestión de sedimentos, durante las últimas décadas se han reducido significativamente las tasas de erosión de suelos en el país (USDA, 2010). Paralelamente, muchas leyes han creado incentivos y una fuerte industria de control de sedimentos. La Figura 6-1 ilustra la evolución de las tasas nacionales y regionales de erosión durante las últimas décadas en Estados Unidos, en donde se puede apreciar que la mayor parte de la erosión hídrica en 2007 (54%) ocurrió en el “Cinturón del Maíz” y en las Llanuras del Norte (USDA, 2010). Debido a factores climáticos, características del suelo, características del paisaje y prácticas de cultivo, la erosión del suelo se concentra geográficamente.

Asimismo, el 93% de la erosión eólica ocurre en las regiones del “Northern Plains, Southern Plains, Mountain y Lake States”. Aunque solo se considera un uso de la tierra en este mapa (agricultura), este proporciona una línea base para comprender la relación entre clima, suelos y tipo y cantidad de procesos de erosión (Figura 61). Esto es importante desde una perspectiva de gestión y conocimiento del clima local y regional, patrones climáticos, suelos, vegetación y medio ambiente, pues es necesario para crear leyes efectivas e implementar las mejores prácticas de prevención y control de

la erosión y los sedimentos, debido a que lo que funciona en climas húmedos no necesariamente se recomienda para regiones más secas (García-Chevesich y Etra, 2012).

Figura 6-1. Evolución de las tasas de erosión en Estados Unidos, en base a factores regionales como clima, suelos, topografía y prácticas de cultivo.



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: USDA, 2010.

En este artículo, los autores analizan el sistema de gestión de sedimentos desarrollado en Estados Unidos, enfatizando la legislación y agencias federales, estatales y locales relacionadas con el control de los sedimentos, los sistemas de incentivos para el control de la erosión, la industria del rubro y la necesidad de replicar este excelente sistema integrado de gestión de sedimentos en otros países.

6.2. Sistema legislativo relacionado con los sedimentos

En 1972 se promulga el Clean Water Act (CWA, Ley de Agua Limpia), creado tras la evaluación de la calidad de las aguas de ríos y cuerpos de agua en Estados Unidos. El CWA se basa en la “prohibición absoluta de descarga de cualquier tipo de contaminante en ríos y cuerpos de agua dentro de los límites de Estados Unidos”. Así, la concentración de contaminantes disminuyó notablemente durante los años siguientes, tras la creación de este instrumento (García-Chevesich *et al.*, 2018). Sin embargo, en 1998 la comunidad científica recaló que el principal contaminante de las aguas del país eran los sedimentos, por lo que, a partir de ese año, se prohibió la emisión y descarga de dicho material particulado en los ríos y cuerpos de agua de Estados Unidos (EPA, 1998).

Gracias al CWA, hoy en día está absolutamente prohibido no controlar los sedimentos en Estados Unidos. Como consecuencia, el control de los sedimentos forma parte del presupuesto en cualquier proyecto de construcción, minería, agricultura, forestación, ganadería o cualquier actividad que altere la capa superficial protectora del suelo. Sin embargo, cada estado estadounidense define sus propios estándares, lo que ha complicado un poco la eficiencia del sistema. Por ejemplo, lo que podría funcionar bien en climas húmedos, no necesariamente es adecuado para climas más áridos, y como muchos estados poseen una alta diversidad climática, el sistema no ha tenido mucho éxito en áreas de escasa precipitación (Figura 6-2).

Figura 6-2. Típico ejemplo de un inadecuado control de la erosión y los sedimentos en zonas áridas de Estados Unidos, en donde por norma se aplican técnicas que son efectivas solamente en climas más húmedos

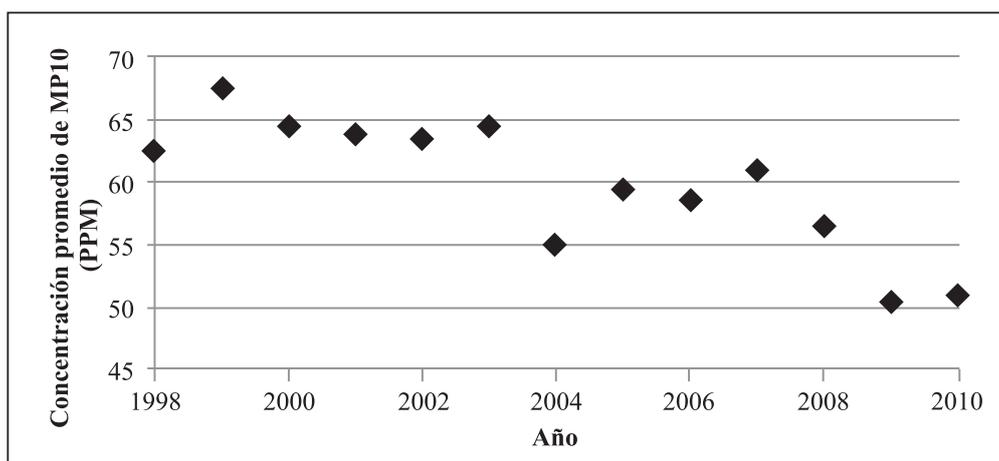


Fuente: García-Chevesich y Etra, 2012.

Pese a que existen buenos sistemas de certificación profesional enfocados al control de la erosión y los sedimentos (Certified Professional in Erosion and Sediment Control), quienes inspeccionan los sitios en donde se controla la erosión no están calificados suficientemente como para determinar si un sistema de control de sedimentos se aplicó correctamente o, si dadas las condiciones de sitio, se debió haber aplicado otra técnica. Por lo anterior, el principal problema que enfrentan las leyes de control de los sedimentos en Estados Unidos es la ausencia de normas específicas según climas, así como el bajo conocimiento del tema por parte de los inspectores (García-Chevesich y Etra, 2012).

Dentro del CWA, existe también un eficiente sistema de regularización de los sedimentos, esta vez desde la perspectiva de la contaminación atmosférica. Los Estándares Nacionales de Calidad del Aire (National Air Quality Standards) y la Ley de Aire Limpio (Clean Air Act, CAA) regularizan la emisión de sedimentos en la escorrentía generada por actividades agrícolas ubicadas en zonas cercanas a centros urbanos con problemas de calidad de aire. Esto se debe a que se ha comprobado que una porción significativa de las PM10 (material particulado de 10 micrones o menos de diámetro) en suspensión está representada por partículas de suelo, a lo que se le denomina “polvo fugitivo” (fugitive dust). De hecho, desde que se incorporaron los sedimentos dentro del CWA, en 1998, la calidad del aire en los principales centros urbanos de Estados Unidos ha mejorado notablemente (Figura 6-3).

Figura 6-3. Evolución de la concentración de MP10 en 279 ciudades estadounidenses tras la creación de la normativa de control de sedimentos



Fuente: García-Chevesich *et al.*, 2014.

Las multas asociadas a no controlar los sedimentos varían según estado y tipo de falta, pero han llegado a ser hasta USD 10.000 por día de violación a la norma en sitios de construcción en Los Ángeles, una de las ciudades más contaminadas del país. Así, la legislación enfocada en el control de los sedimentos dio origen a las mejores prácticas de manejo (Best Management Practices, BMP), las que se detallan más adelante en otras secciones de este documento.

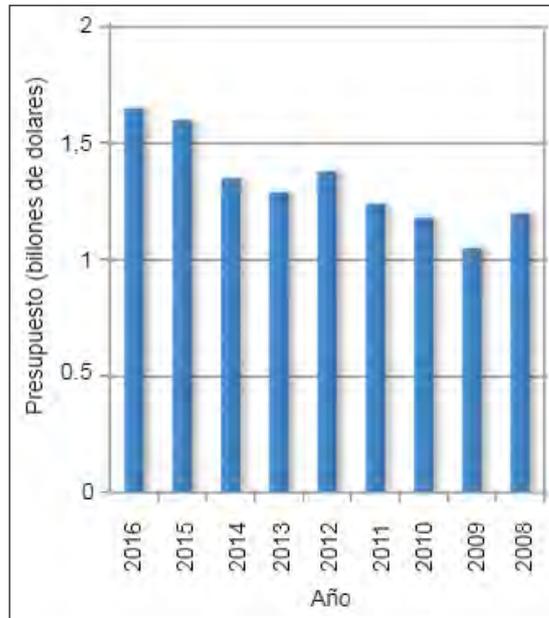
6.3. Sistema de incentivos

El control de los sedimentos en Estados Unidos no solo se basa en regulaciones y multas. Existe, además, un excelente sistema de incentivos para que quienes manejan la tierra sean capaces de costear la instalación de prácticas de captura de sedimentos. Así, existe, en primer lugar, el Programa de Incentivos de Calidad Ambiental (Environmental Quality Incentives Program), dentro del cual se incluyen prácticas de conservación de suelo y aguas, es decir, captura de sedimentos. Dicho programa se creó en 1996 y financia tanto proyectos como asistencia técnica enfocados en el control de los sedimentos. Pueden postular a este sistema de incentivos agricultores, ganaderos, forestales o cualquier disciplina de producción relacionada con el manejo de recursos naturales que altere la superficie del suelo. A partir del año 2015, el Programa financia proyectos de hasta 10 años, con montos de hasta USD 450.000. La evolución del presupuesto anual nacional para este programa de financiamiento se ilustra en la Figura 6-4.

Paralelamente, existe el Incentivo Nacional de Calidad de Agua (National Water Quality Incentive), en el que se incluyen los sedimentos como parte importante de dicho instrumento. Creado en el año 2012, este incentivo ha financiado al año fiscal 2015 casi USD 85 millones, con un presupuesto anual de USD 25 millones, bastante inferior al sistema de incentivos anteriormente descrito. Sin embargo, este sistema se basa en cuencas prioritarias. Es decir, cada año los estados norteamericanos analizan sus cuencas y definen entre una y doce cuencas prioritarias (por estado), de acuerdo con su condición de degradación. Así, pueden postular a estos fondos solo quienes posean tierras dentro de los límites de una cuenca prioritaria, en un año dado.

Paralelamente, cada agencia federal y estatal cuenta con sus propios programas de incentivos relacionados con los sedimentos, los cuales se describen en otras secciones de este documento.

Figura 6-4. Evolución del presupuesto para cada año fiscal del “Environmental Quality Incentives Program”, en miles de millones de dólares



Fuente: EPA 2015.

6.4. Inventarios de sedimentos

Los sedimentos en Estados Unidos son evaluados mediante un Inventario Nacional de Calidad de Aguas (National Water Quality Inventory), que no se realiza en forma anual, pero sí se actualiza constantemente. La información actualizada de la carga máxima diaria de sedimentos (Total Maximum Daily Loads) se puede obtener en línea (<http://www.epa.gov/waters/ir/>), en donde es posible acceder a informes anteriores, por estado o cuerpo de agua. En general, los sedimentos afectan alrededor de un 15% de la longitud total de los ríos considerados y solo un 5% del área total de lagos y reservorios.

6.5. Industria y tecnologías asociadas a los sedimentos

Como ya se mencionó, las actuales leyes que obligan a controlar los sedimentos en Estados Unidos dieron origen a una gran industria, la cual ha sido encabezada por la International Erosion Control Association (IECA). Entre los productos más utilizados, calificados como BMP dentro de las normas, se encuentran: hidrosiembra (hydroseeding), biorrollos (straw wattles), mallas de limo (silt fences), mantas estabilizadoras y geosintéticos (erosion blankets and geosynthetics), gaviones (gabions), escolleras (rip-raps) y cortinas de turbidez (turbidity curtains), entre muchos otros. Todos estos productos son manufacturados por distintas empresas y su aplicación debe ser diseñada correctamente por un profesional que entienda no solo de suelos, plantas y agua, sino además de ingeniería y procedimientos de diseño hidrológico bajo ciertos períodos de retorno y factores de seguridad. Sin embargo, como ya se mencionó, quienes están a cargo dichos proyectos se enfocan más en la venta de sus productos que en el éxito del proyecto, caso que ocurre más que nada en climas más secos.

Pese a que aún se continúa utilizando el método de colección en botella para la estimación de la concentración de sedimentos en cursos de agua de Estados Unidos, hoy en día existen muchas tecnologías para estimar dicha concentración en forma instantánea, aunque por razones prácticas solo algunas han prosperado. Existen métodos ópticos (transmisión y reflexión óptica), reflejo de

un haz de luz, difracción de láser, método acústico, método nuclear, tubo vibrador, diferencia de presiones y método de impacto, todos enfocados en la estimación instantánea de la concentración de sedimentos en un curso de agua dado, economizando tiempo y recursos. Todos los métodos nombrados requieren de un proceso de calibración (Wood y Teasdale, 2013). Entre los métodos nombrados, es el método acústico (*acoustic meters*) el que actualmente se está utilizando en la mayor parte del país (por el US Geological Survey, USGS, Office of Surface Water) como tecnología de estimación de concentraciones de sedimentos, debido a su alta precisión. De este modo, el USGS monitorea la concentración de sedimentos en tiempo real en más de 500 ríos de Estados Unidos, permitiendo contar con las siguientes ventajas:

- Generar sistemas de alerta temprana para estaciones hidroeléctricas y de suministro de agua.
- Ser capaz de monitorear los efectos de incendios, actividades de construcción, excavaciones, etc., en la distribución espacial y temporal de los sedimentos.
- De igual forma, gracias a esta tecnología se pueden monitorear los efectos de actividades de remediación y cambios de uso de la tierra en la producción de sedimentos.

Sin embargo, pese a la efectividad del sistema, el USGS reconoce la necesidad de educar y establecer estándares en torno a la estimación de sedimentos con métodos acústicos, por lo que en 2014 creó el Equipo Multiagencia de Liderazgo en Acústica de Sedimentos (Multi-agency Sediment Acoustic Leadership Team, SALT).

6.6. Agencias federales relacionadas con los sedimentos

Existen muchas agencias federales estadounidense involucradas en la gestión de los sedimentos. Un enfoque desde lo más amplio hasta lo más específico requiere que las agencias federales, como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), monitoreen y reduzcan la producción de sedimentos con la ayuda de agencias estatales y locales. Además, también existen los programas de incentivos antes descritos, en los cuales las agencias federales se asocian con productores y propietarios para controlar la producción de sedimentos a través de prácticas de conservación.

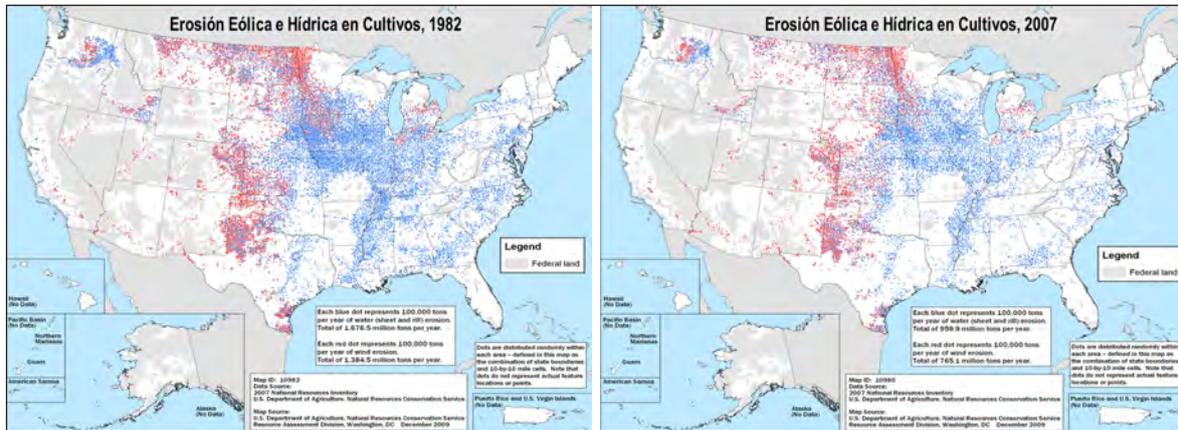
USDA - NRCS

La escorrentía producida en terrenos agrícolas y urbanos es la principal fuente de contaminación del agua en Estados Unidos, con más de 4.000 millones de toneladas de sedimentos desprendidos cada año (García-Chevesich *et al.*, 2018). La erosión del suelo causada por el viento, el agua y la gravedad afecta significativamente la productividad y la calidad de suelos agrícolas, así como las tensiones en la economía agroalimentaria. Por consiguiente, el USDA proporciona herramientas y guías para el uso de medidas de control de sedimentos en múltiples actividades, incluyendo la construcción, la minería, la agricultura y la silvicultura.

Dentro del USDA se encuentra el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (Natural Resources Conservation Service, NRCS), entidad creada en 1935 como el Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service, SCS), que se desarrolló originalmente como resultado del “Dust Bowl” de 1930 para ayudar a los agricultores a conservar sus tierras (USDA, 2017b). En la década de 1950, el NRCS creó un “banco de suelos” (soil bank) para proteger y conservar suelos altamente erosionables. En 1985, se creó el Programa de Reserva de Conservación (Conservation Reserve Program, CRP) para proporcionar asistencia de costo compartido a tierras agrícolas y promover prácticas agrícolas sostenibles que redujeran la emisión de sedimentos (USDA, 2017b). Desde

la década de 1980, tanto la erosión eólica como la hídrica han disminuido en suelos agrícolas de Estados Unidos, como ya se ha mencionado con anterioridad (Figura 6-5).

Figura 6-5. La erosión eólica (en rojo) y la erosión hídrica (en azul) se han reducido significativamente debido a la implementación de mejores prácticas y de programas de incentivos en Texas, el oeste y el sureste de Estados Unidos



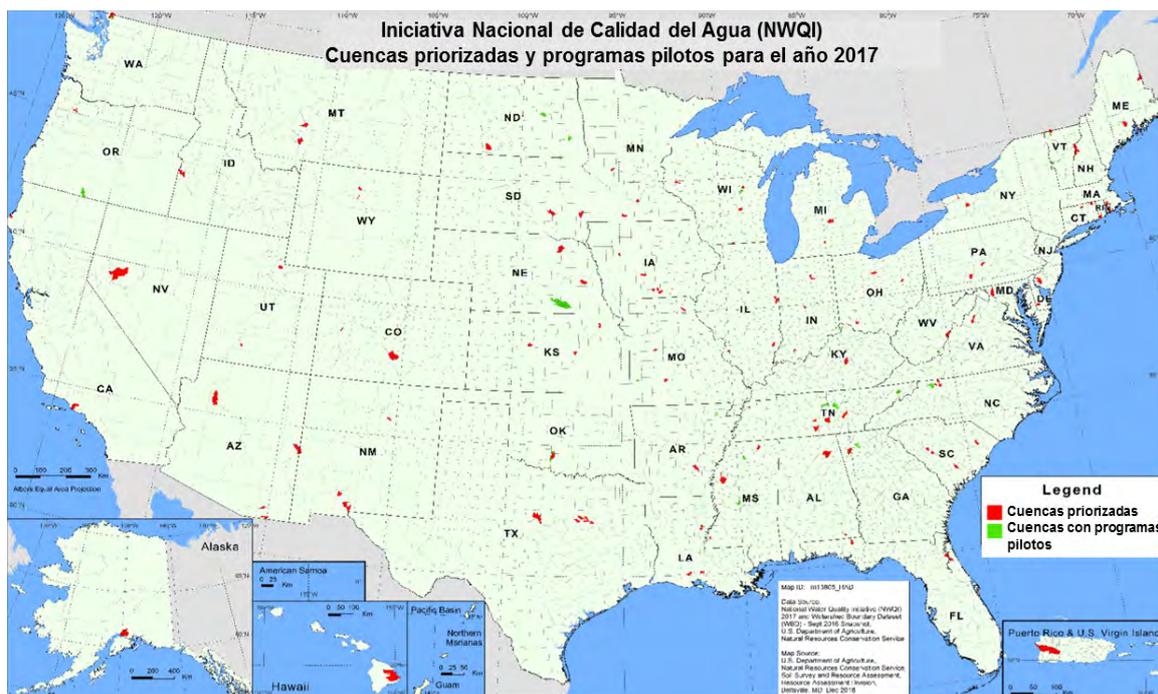
Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: NRCS, 2010.

El NRCS tiene varios programas de incentivos y asistencia para reducir la emisión de sedimentos en la agricultura, tales como el Programa de Incentivos a la Calidad Ambiental (EQIP), el Programa de Manejo en Conservación (CSP), el Programa de Protección de Cuencas de Emergencia (EWP) y el Programa de Reserva de Pastizales (GRP), todos con el fin de conservar y proteger los recursos naturales (USDA, 2017c). Las prácticas de manejo del EQIP para reducir la emisión de sedimentos incluyen la plantación de árboles para cortavientos y cinturones de protección, manejo del agua de riego, y la práctica de la siembra directa y manejo de residuos de cultivos para minimizar la perturbación del suelo. El CSP es un programa voluntario de conservación para incrementar las actividades de conservación y mejorar el suelo, el agua y el aire. El EWP se enfoca en reducir el escurrimiento en las vías fluviales y proteger las llanuras de inundación con el fin de mitigar y reducir los daños causados por las inundaciones, las sequías y los sedimentos en los cursos de agua. El GRP promueve un sistema de pastoreo cuyo objetivo es proteger las gramíneas y hierbas nativas, y así reducir la producción de sedimentos y mejorar la condición del suelo.

Otro programa de incentivos es la Iniciativa Nacional de Calidad del Agua (National Water Quality Initiative, NWQI), que ya se ha descrito (Figura 6-6). El NRCS trabaja con productores y propietarios para mejorar la calidad del agua y mantener la productividad agrícola (USDA, 2017d). Al ayudar a mejorar la salud del suelo mediante la reducción de los sedimentos, las prácticas agrícolas pueden ser más productivas y rentables. Además, el ecosistema y la calidad del agua mejoran al disminuir el aporte de nutrientes y sedimentos hacia humedales y vías fluviales.

Figura 6-6. Cuencas y proyectos pilotos de la Iniciativa Nacional de Calidad del Agua NWQI



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: NRCS, 2017d.

Adicionalmente, el NRCS elaboró un Sistema de Directivas Electrónicas (eDirectives), que está disponible en línea y contiene políticas, manuales y guías para ayudar a los usuarios a desarrollar planes de manejo específicos para cada sitio, enfocados en el control de los sedimentos (USDA, 2017e).

EPA

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) fue creada en 1970 para supervisar y hacer cumplir la protección del medio ambiente. Poco después de la creación de la agencia, la Ley Federal de Control de la Contaminación del Agua de 1948 fue enmendada, en 1972, para establecer estándares de calidad del agua, implementar estándares de control de contaminación y regular el vertido en aguas, a menos que sea permitido (USEPA, 2017a).

La EPA desarrolla e interpreta las políticas, la orientación y los criterios de la Ley de Agua Limpia (CWA), antes mencionada. La Sección 402 (p) de la CWA exige que los “vertidos asociados con la actividad industrial” obtengan un permiso del Sistema Nacional de Eliminación de Descargas de Contaminantes (NPDES). La mayoría de los vertidos están cubiertos bajo permisos generales, y los estados también están autorizados a emitirlos. Los permisos individuales pueden ser emitidos para algunas circunstancias específicas del sitio o de la industria. Son necesarios todos los permisos para desarrollar un plan de prevención de contaminación de aguas pluviales (Stormwater Pollution Prevention Plan, SWPPP), además de cumplir con las disposiciones especiales y presentar una notificación de intención (NOI) o solicitud de permiso a la autoridad correspondiente (USEPA, 2009).

Según lo autorizado por la Sección 303 (c) de la CWA, las Normas de Calidad del Agua Superficial (SWQS) son reguladas por la EPA, así como por las agencias ambientales estatales. El WQS proporciona líneas de base para promover la vida acuática y la vida silvestre, el uso recreativo y el agua potable en el agua superficial (EPA, 2014). Otros programas de CWA, tales como el total de cargas diarias máximas (TMDL), permisos de Sección 404 y permisos de NPDES, dependen de la

SWQS. La contaminación por sedimentos en aguas superficiales está regulada por la SWQS para asegurar que se controlen las fuentes de contaminación y se limiten los sedimentos contaminados y los sedimentos en exceso en los ecosistemas acuáticos.

El Sistema Nacional de Eliminación de Descargas de Contaminantes (National Pollutant Discharge Elimination System, NPDES), creado en 1972 como parte de la CWA, regula el vertido de aguas pluviales desde posibles fuentes contaminantes, incluidas las de construcción e industriales (USEPA, 2017b). Actualmente, 46 estados y un territorio están autorizados para implementar el programa de permisos de NPDES, mientras que la EPA ha concedido la autoridad en dos estados y en la mayoría de las reservas indígenas. Un permiso NPDES permite a una instalación descargar una cantidad específica de contaminantes en un cuerpo de agua, pero no puede exceder la cantidad especificada en el permiso. Para sitios de construcción de más de un acre, las aguas pluviales que fluyen desde el lugar pueden recoger sedimentos, escombros y químicos y pueden contaminar ríos, lagos o aguas costeras (USEPA, 2017b). Para reducir la cantidad de sedimentos y contaminantes que pueden fluir desde construcciones, deben implementarse las mejores prácticas de manejo (BMP), junto con un SWPPP que identifique todas las fuentes potenciales de contaminación, control de la erosión y descarga de sedimentos, y que cumpla con el CWA. Para la construcción y otras actividades industriales, la EPA y los tomadores de decisiones estatales pueden adoptar enfoques caso por caso con respecto a permisos generales de construcción bajo las provisiones de la CWA y las leyes estatales (USEPA, 2009).

Como complemento de lo anterior, las Normas Nacionales de Calidad del Aire (National Ambient Air Quality Standards, NAAQS) están diseñadas para limitar las emisiones de sedimentos por causa de actividades agrícolas e industriales en y cerca de áreas urbanas con mala calidad del aire. Los sedimentos desprendidos y transportados por el viento pueden encontrarse en forma de suspensión en el aire y causar problemas ambientales y de salud. Las partículas de sedimento representan una porción significativa del MP10 (material particulado de 10 micrómetros o menos de diámetro) en suspensión, como ya se ha mencionado.

USACE

El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (USACE) es la principal agencia federal de control de inundaciones y mantiene un riguroso programa de investigación y desarrollo para apoyar los recursos hídricos y las actividades de construcción (USACE, 2017). La USACE regula las “vías navegables” bajo la Sección 10 de la Ley de Aguas y Puertos de 1899 y descarga y llenado de material en las aguas de Estados Unidos, incluyendo humedales bajo la Sección 404 del CWA (USACE, 2017).

En conjunto con la EPA, la USACE desarrolla políticas y orientaciones y hace cumplir las disposiciones de permisos de Sección 404 y Sección 10. El programa de permisos de la Sección 404 promueve mejores prácticas de manejo para reducir la erosión y acumulación de sedimentos en vías navegables, incluyendo además las actividades de construcción tales como diques, presas, carreteras y minería. Todas deben obtener un permiso antes de alterar e impactar vías fluviales.

USFWS y NMFS

El Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos (U.S. Fish and Wildlife Service, USFWS) y el Servicio Nacional de Pesca Marítima (National Marine Fisheries Service, NMFS) se encargan de evaluar los impactos de los sedimentos en peces y vida silvestre, en todo nuevo proyecto federal o cualquier proyecto permitido, incluyendo aquellos relacionados con la Sección 404 (USFWS, 2015). Como parte de la Sección 404 del CWA, el USFWS y el NMFS desempeñan importantes funciones consultivas para evaluar posibles efectos adversos que incluyan directamente los recursos de humedales y vida silvestre, realizar visitas a sitios para evaluar la funcionalidad biológica y la calidad

del hábitat, y minimizar los posibles impactos de los sedimentos en humedales, asegurando que las especies protegidas federalmente estén fuera de peligro (USFWS, 2015).

BLM

La Oficina de Administración de Tierras de Estados Unidos (U.S. Bureau of Land Management, BLM) administra más de 250 millones de acres de terrenos públicos para mantener su diversidad y productividad (Voigt *et al.*, 1997). La BLM administra la recreación al aire libre, el pastoreo de ganado, la extracción de minerales, la producción de energía, entre otros usos de la tierra. Sus principales objetivos de conservación son el suelo, el agua y el aire. En particular, la BLM cuantifica, estudia y gestiona la sedimentación en zonas ribereñas, la restauración de minas abandonadas y el control de la salinidad a través del uso de mejores prácticas.

El BLM estableció un Equipo Nacional de Servicios Ribereños (National Riparian Service Team, NRST) que se enfoca en la capacitación y consultorías para restaurar las condiciones de funcionamiento apropiado de zonas ribereñas. Se centra en los impactos de la sedimentación y la erosión causada por el pastoreo, la construcción de carreteras, las condiciones de las tierras altas en cuencas y el fuego, entre otros factores (Voigt *et al.*, 1997).

USGS

El Servicio Geológico de Estados Unidos (U.S. Geological Survey, USGS) recopila y monitorea datos de caudales, incluyendo datos de sedimentos suspendidos y erosión de suelos. El Sistema Nacional de Información de Agua del USGS (USGS National Water Information System, NWIS) proporciona la concentración de sedimentos suspendidos (periódicamente recolectada), localizados en los puntos de monitoreo de caudal del USGS. También ofrece información sobre propiedades del suelo, área de drenaje, ecorregión y uso del suelo para entender las características del sitio (USGS, 2017a).

USFS

Los incendios forestales pueden tener implicancias significativas en la calidad del agua, la escorrentía y la erosión en cuencas forestadas (García-Chevesich, 2015). La erosión del suelo debida a incendios forestales ha aumentado debido a décadas de extinción de incendios, cambio climático y cambios en el uso de la tierra. Las tasas de erosión post incendio pueden degradar gravemente la calidad de la tierra y el agua, representando un problema serio para quienes administran la tierra y los recursos hídricos (Elliot *et al.*, 2016).

El Programa de Inventario y Análisis Forestal (Forest Inventory and Analysis Program, FIA) del Servicio Forestal de Estados Unidos (United States Forest Service, USFS), creado en 2001, implementó un programa nacional de monitoreo de suelos que analiza la calidad del suelo en todas las áreas forestales de Estados Unidos (USDA, 2007). Es el único esfuerzo nacional para monitorear la calidad del suelo forestal y provee una línea de base para el estado actual del recurso suelo y comprobar cómo la perturbación afecta la salud y productividad de los bosques (USDA, 2007). Mediante la recolección de parcelas de campo y análisis de laboratorio, es posible monitorear la erosión del suelo, su compactación y composición química.

NPS

El Servicio de Parques Nacionales del Departamento de Interior de Estados Unidos (U.S. Department of Interior's National Park Service, NPS) provee importantes inventarios de suelos, mapas y manejo del recurso suelo de parques nacionales reconocidos federalmente. La conservación del suelo es una

parte integral de una gestión efectiva para asegurar que los parques permanezcan en condiciones óptimas para que la gente los visite. Un inventario sistemático de suelos y un programa de mapeo es compatible con la Ley de Política Ambiental Nacional (National Environmental Policy Act, NEPA) y la Ley de Preservación Histórica Nacional (National Historic Preservation Act, NHPA) y se basa en métodos y técnicas estándares de la Cooperativa Nacional de Inventarios de Suelos (National Cooperative Soil Survey, NCSS), las que se describen en un memorando que regula los suelos en tierras del NPS. Los inventarios proporcionan datos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos, necesarias para manejarlos y protegerlos, así como al agua, a la vegetación y a la vida silvestre, y predecir la erosión, la producción de sedimentos, la contaminación aguas abajo y la degradación de la tierra (Garcia-Chevesich, 2018).

La compactación del suelo y la erosión son problemáticas dentro de los parques por las actividades de recreación al aire libre (senderismo, escalada en roca, vehículos todo terreno, etc.) y la construcción de instalaciones e infraestructura del parque (alcantarillado, puentes, carreteras y senderos). Para preservar el ambiente natural, la erosión del suelo en los parques se mantiene a niveles casi naturales para reducir la degradación del medio ambiente y los niveles de sedimentación en las aguas superficiales (DOI, 2004). En general, las actividades humanas no deben incrementar la erosión más allá del umbral de erosión natural. Dicho umbral es la tasa de erosión máxima aceptable (en toneladas/acre-año) para un sitio específico que no afecte negativamente a la productividad del suelo ni exceda la tasa de formación del suelo.

6.7. Agencias estatales, de condados y locales relacionadas con los sedimentos

Además de las agencias federales, las agencias estatales, de condados (counties) y locales también monitorean las tasas de emisión de sedimentos y aseguran el cumplimiento de las leyes federales. Cada agencia estatal de regulación ambiental, en conjunto con los gobiernos locales y de condados, redacta sus leyes y regulaciones relacionadas con el control de los sedimentos, las que a menudo son más estrictas que sus contrapartes federales (Garcia-Chevesich, 2018).

Agencias estatales

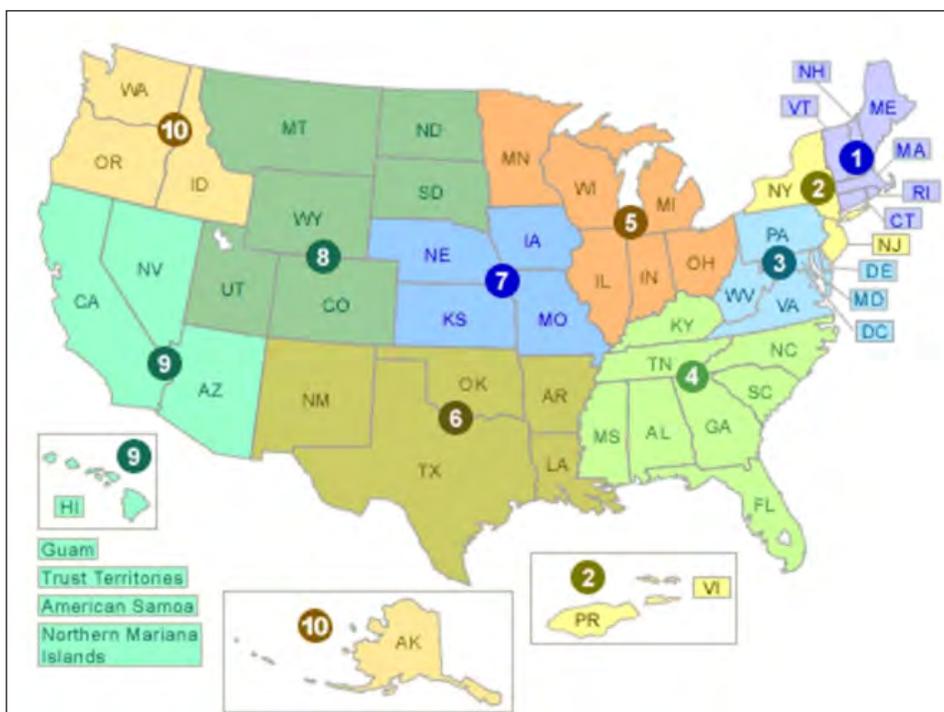
La EPA se subdivide en 10 oficinas regionales (Figura 6-7) las que regulan todos los estados, territorios y reservas indígenas de Estados Unidos (EPA, 2017d). Cada estado tiene una agencia ambiental principal que ayuda a supervisar y hacer cumplir las regulaciones.

Por ejemplo, SWQS y NAAQS que tienen límites por hora, día y mes para contaminantes a los que deben mantenerse bajo cumplimiento federal, son generalmente más rigurosos que los estándares federales. A partir del 13 de febrero de 2017, algunos centros urbanos importantes, como Phoenix (Arizona), Nueva York (New York), Salt Lake City (Utah) y áreas aledañas a Los Ángeles (California), tienen como moderada a grave la falta de cumplimiento para MP10 (USEPA, 2017c). El Departamento Estatal de Calidad Ambiental (State Department of Environmental Quality, SDEQ) proporciona diariamente pronósticos del índice de calidad del aire y asistencia para reducir la contaminación por polvo en las operaciones industriales y agrícolas (ADEQ, 2017; NYSDEC, 2017; Utah DEQ, 2017; CalEPA, 2017). Así, todos los estados poseen un plan estatal de implementación (State Implementation Plan, SIP) requerido por la EPA para establecer metas con el fin de reducir la contaminación del aire. Por lo general, el riesgo de contaminación por polvo se basa en factores tales como el tipo de actividad que incrementa el material particulado en la atmósfera, la velocidad del viento y la lluvia. Los MP10 son monitoreados en todo el estado cada hora (ADEQ, 2017).

Además de las agencias ambientales estatales, otras agencias gubernamentales colaboran de forma adicional para monitorear la calidad ambiental, brindan apoyo para la aplicación de la normativa ambiental relacionada con los sedimentos e investigan formas de mejorar las leyes y reglamentos.

En Texas, por ejemplo, la agencia ambiental que gobierna es la Comisión de Calidad Ambiental de Texas (Texas Commission on Environmental Quality, TCEQ); sin embargo, agencias como la Junta de Desarrollo de Agua de Texas (Texas Water Development Board, TWDB) otorgan subsidios y préstamos para agua y aguas residuales, recopilan datos sobre las bahías y estuarios del estado, y un repositorio de datos centralizado para los recursos naturales, entre otras cosas. Además, dicha agencia publicó el Plan Estatal de Agua 2007 y está a cargo del Programa Nacional de Seguros contra Inundaciones, transferido a TWDB de la TCEQ (García-Chevesich *et al.*, 2018). Cada estado tiene agencias similares que proporcionan recursos e información, como la Junta de Desarrollo del Agua de Wyoming o la Junta de Conservación de Agua de Colorado.

Figura 6-7. Distribución administrativa de las 10 oficinas regionales de la EPA



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: EPA, 2017d.

Agencias de condado y municipales

A diferencia de las áreas rurales, en zonas urbanas es más probable que los contaminantes superen los estándares de calidad del aire y del agua debido a los constantes cambios en el uso de la tierra, el aumento de la superficie impermeable y las poblaciones más densas. Los cambios en el uso de la tierra y las superficies impermeables desempeñan un papel importante en el incremento de la emisión de sedimentos y la degradación de los recursos hídricos superficiales. Las superficies impermeables, tales como techos, calles y estacionamientos, aumentan la escorrentía urbana y la cantidad de sedimentos, nutrientes, hidrocarburos y otros contaminantes (NRCS 2008). Así, muchos condados y municipios han adoptado ordenanzas de control de sedimentos, de acuerdo con las autoridades estatales y federales, para minimizar los daños causados por dicho material particulado. Tales ordenanzas incluyen reglamentos de construcción, que deben cumplir con la CWA, mediante el control de la erosión en sitios de construcción. Las estrategias específicas de planificación urbana para abordar el control de sedimentos en sitios de construcción pueden minimizar la contaminación (aire y agua) y preservar los recursos acuáticos (García-Chevesich *et al.*, 2018).

Las ordenanzas de una ciudad o condado a menudo requieren la implementación de un plan de control de erosión (Storm Water Pollution Prevention Plan, SWPPP), que es un documento que

establece medidas de control de sedimentos tanto temporales como permanentes, usadas durante la etapa de construcción (NRCS, 2008). Los gerentes de construcción deben desarrollar un documento SWPPP específico de cada sitio para ser aplicado durante la construcción y, además, para las agencias reguladoras responsables de la supervisión. Los objetivos de un SWPPP son identificar fuentes potenciales de contaminación de aguas pluviales, describir métodos para reducir la emisión de sedimentos y mostrar procedimientos para cumplir con un permiso general de construcción. El fracaso en implementar un SWPPP puede resultar en multas significativas de una agencia ambiental estatal o de la EPA, las que pueden alcanzar hasta USD 10.000 por día. El primer paso en la elaboración de un SWPPP es evaluar el sitio, planificar y formar un equipo de prevención de la contaminación compuesto por personal calificado que ayudará en la planificación e implementación de prácticas de gestión. Luego, el operador debe seleccionar las mejores prácticas (BMP) de control de sedimentos que sean aplicables y apropiadas al sitio específico, para así minimizar la descarga. Por último, se requiere también monitoreo y mantenimiento de las BMP y almacenamiento de registros (USEPA, 2009).

El control de los sedimentos tiene dos objetivos principales para diseñar un eficaz SWPPP. La erosión puede evitarse al reducir el desprendimiento de las partículas de suelo, mediante la instalación de cubiertas protectoras (NRCS, 2008; García-Chevesich, 2015). El control de sedimentos ya desprendidos, por otro lado, se basa en la captación de partículas de suelo aguas abajo. Al disminuir la velocidad del viento o la velocidad del flujo hídrico, según corresponda, el sedimento puede depositarse (sedimentación). Sin embargo, esto es más caro que el control de la erosión en el punto de origen de las partículas y debería ser un objetivo de diseño secundario (NRCS, 2008). Algunas medidas utilizadas para el control de sedimentos ya desprendidos son mallas de limo, biorrollos, fardos de paja, cortinas de turbidez y diques continuos, entre otros. Cada estrategia de diseño tiene sus ventajas y limitaciones y la creación de un plan específico del sitio requiere identificar áreas vulnerables a la erosión y comprender el clima, el tipo de suelo local, la topografía y el paisaje natural, que dictaminan la cantidad de erosión que puede ocurrir.

Un ejemplo de control de la erosión y los sedimentos implementado en la ciudad de Long Tree (Colorado), es el Programa de Control de Grados, Erosión y Sedimentos (Grading, Erosion and Sediment Control, GESC), que se aplica a nuevos proyectos de urbanización y remodelación. El Programa GESC y el Programa de Control de Erosión y Sedimentación del Drenaje (Drainage Erosion and Sediment Control Program) permiten la construcción y proyectos que alteren la tierra, siempre que implementen BMP de control de erosión y sedimentos. El programa está autorizado por el Código de Zonificación de la Ciudad y sigue el Programa del GESC del Condado de Douglas, ordenado por el Gobierno Federal y el Estado de Colorado (García-Chevesich *et al.*, 2018)

El manejo de aguas residuales es extremadamente importante para gestionar y remediar la contaminación y los contaminantes. El ya mencionado programa NPDES de la EPA regula la contaminación de los municipios, plantas de tratamiento de aguas residuales industriales y sistemas de alcantarillado y aguas pluviales (USEPA, 2017b). Las divisiones de tratamiento de aguas residuales de varias ciudades y divisiones de residuos peligrosos tienen planes de manejo de sedimentos desarrollados para remediar su contaminación. Entre los contaminantes más comunes se incluyen bacterias, metales pesados y bifenilos policlorados (PCB), y su extracción puede ser muy costosa. Los sedimentos que están contaminados pueden ser dragados o cubiertos, y requieren eliminación y/o tratamiento si se remueven. Con el tiempo, los embalses de abastecimiento de agua municipales e industriales y los cursos de agua pueden contaminarse y perder capacidad de almacenamiento debido a la sedimentación. Los sedimentos contaminados pueden ser tratados en el sitio o removidos y transportados a un vertedero autorizado para recolectar material sucio. La limpieza está regulada por la EPA. Si el sedimento presenta un riesgo para los seres humanos y/o el medio ambiente debe limpiarse o removerse.

Existen, además, incentivos para el control de la erosión en la construcción de edificios. Los sistemas de certificación de edificios, como el Consejo de Construcción Verde de Estados Unidos (U.S. Green Building Council), que regula las certificaciones LEED (Leadership in Energy and

Environmental Design), requieren edificios certificados por LEED para incorporar BMP, con el fin de reducir y controlar la erosión y sedimentación durante la etapa de construcción (USGBC, 2017). Los edificios certificados LEED deben ajustarse a los planes de SWPPP de la EPA para cumplir con los estándares de certificación.

6.8. Conclusiones

La erosión y los sedimentos tienen implicancias económicas y ambientales (pérdida de la productividad de la tierra, contaminación de sistemas fluviales y del aire), que se encuentran bien documentadas. El control de los sedimentos en Estados Unidos se realiza en múltiples niveles administrativos, dentro de una variedad de agencias federales, estatales y locales. Las prácticas de gestión adoptadas por cada una de estas agencias implican un complejo conjunto de leyes, reglamentos y procedimientos institucionalizados. La implementación exitosa de los esfuerzos de mitigación de la erosión a menudo involucra la gestión colaborativa y la toma de decisiones que están en sintonía con la autoridad reguladora específica de cada una de estas agencias. Para monitorear y reducir significativamente las tasas de erosión y la producción de sedimentos, es esencial un esfuerzo colaborativo que involucre a múltiples agencias federales, estatales y locales, industrias y organizaciones no gubernamentales.

El ejemplo de Estados Unidos en torno a la gestión de sedimentos en todos sus niveles es una línea que podría aplicarse en países de Iberoamérica, en donde la normativa se encuentra en niveles muy bajos, con consecuencias ambientales, económicas y sociales.

6.9. Referencias bibliográficas

- Arizona Department of Environmental Quality (2017). Air Quality Forecast. <http://www.azdeq.gov/programs/air-quality-programs/air-forecasting>. Accessed 8 May 2017.
- California Environmental Protection Agency (2017). Air Quality Resources Board. <https://www.arb.ca.gov/homepage.htm>. Accessed 8 May 2017. City of Lone Tree. 2015. Grading, erosion and control fact sheet. Public Works Department.
- Elliot, W. J.; Miller, M. E.; Enstice, N. (2016). "Targeting forest management through fire and erosion modelling". *International Journal of Wildland Fire*, 25(8), 876-887.
- Fryirs, K. (2013). "(Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem". *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(1), 30-46.
- García-Chevesich, P.; Jones, S. L.; Daniels, J. M.; Valdés-Pineda, R.; Venegas-Quiñones, H.; Pizarro, R. (2018). "Marco legislativo para la gestión de sedimentos en Estados Unidos". *Ingeniería del Agua*, 22(2), 53-67.
- García-Chevesich, P. (2015). *Control de la erosión y recuperación de suelos degradados*. Outskirts Press. 486 p.
- García-Chevesich, P.; Alvarado, S.; Neary, D.; Valdes, R.; Valdes, J.; Aguirre, J.; Mena, M.; Pizarro, R.; Jofré, P.; Vera, M.; Olivares, C. (2014). "Respiratory disease and particulate air pollution in Santiago Chile: Contribution of erosion particles from fine sediments". *Journal of Environmental Pollution* 187(April): 202-205. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.12.028.
- García-Chevesich, P.; Etra, J. (2012). "Using vegetation to stabilize slopes". *Environmental Connection*, 6(1), 28-29.
- García-Ruiz, J. M.; Beguería, S.; Nadal-Romero, E.; González-Hidalgo, J. C.; Lana-Renault, N.; Sanjuán, Y. (2015). "A meta-analysis of soil erosion rates across the world". *Geomorphology*, 239, 160-173.
- Illinois Natural Resource Conservation Service. Electronic Field Office Technical Guide. (eFOTG). USDA-NRCS. <http://www.nrcs.usda.gov/technical/efotg/>.

- Minnesota Pollution Control Agency (2013). "Spicer State Highway 23-stormwater management for linear projects". https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Spicer_State_Highway_23_-_stormwater_management_for_linear_projects. Accessed 30 April 2017.
- Mitas, L.; Mitasova, H. (1998). "Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention". *Water Resources Research*, 34(3), 505-516.
- New York State Department of Environmental Conservation (2017). Air. <http://www.dec.ny.gov/chemical/281.html>. Accessed 8 May 2017.
- Renwick, W. H.; Smith, S. V.; Bartley, J. D.; Buddemeier, R. W. (2005). "The role of impoundments in the sediment budget of the conterminous United States". *Geomorphology*, 71(1-2), 99-111.
- U.S. Army Corps of Engineers (2017). "Introduction". A brief history. <http://www.usace.army.mil/About/History/Brief-History-of-the-Corps/Introduction/>. Accedido 30 abril 2017.
- U.S. Army Corps of Engineers (2013). Grass GIS turns 30 - ERDC's CERL was there at the start. <http://www.erd.usace.army.mil/Media/News-Stories/Article/476565/grass-gis-turns-30-erdcs-cerl-was-there-at-the-start/>. Accedido 30 abril 2017.
- U.S. Department of Agriculture (2007). "Construction site soil erosion and sediment control fact sheet". Natural Resource Conservation Service. October, Illinois.
- U.S. Department of Agriculture (2017a). "Research." Natural Resource Conservation Service. October, Illinois. Accedido 21 abril 2017. <https://www.ars.usda.gov/midwest-area/west-lafayette-in/national-soil-erosion-research/docs/wepp/research/>.
- U.S. Department of Agriculture (2017b). "Natural Resource Conservation Service". <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/site/national/home/>. Accedido 21 marzo 2017.
- U.S. Department of Agriculture (2017c). "Incentive Programs and Assistance for Producers". Natural Resource Conservation Service, <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/climatechange/resources/?cid=stelprdb1043608>. Accedido 23 marzo 2017.
- U.S. Department of Agriculture (2017d). "National Water Quality Initiative". Natural Resource Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/water/?cid=stelprdb1047761>. Accedido 30 abril 2017.
- U.S. Department of Agriculture (2017e). eDirective. Electronic Directives. Natural Resource Conservation Service. <https://directives.sc.egov.usda.gov/Default.aspx>. Accedido 23 abril 2017.
- U.S. Department of Agriculture (2010). "2007 National Resource Inventory: Soil Erosion on Cropland". Natural Resource Conservation Service. Inventory and Assessment Division, Washington DC. 1-27.
- U.S. Department of Agriculture (2008). "Urban Soil Erosion and Sediment Control. Conservation practices for protecting and enhancing soil water resources in growing and changing communities. Association of Illinois Soil and Water Conservation Districts". Natural Resource Conservation Service. Pp. 1-16.
- U.S. Department of Agriculture (2007). Soil Quality. Forest Service. <https://www.nrs.fs.fed.us/fia/topics/soils/>. Accedido 23 abril 2017.
- U.S. Department of the Interior (2004). Soil Resources Management. National Park Service. <https://www.nature.nps.gov/rm77/soils/programguide.cfm>. Accedido 23 marzo 2017.
- U.S. Environmental Protection Agency (2017a). "History of the Clean Water Act". <https://www.epa.gov/laws-regulations/history-clean-water-act>. Accedido 21 marzo 2017.
- U.S. Environmental Protection Agency (2017b). "National Pollutant Discharge Elimination System". <https://www.epa.gov/npdes>. Accedido 21 marzo 2017.
- U.S. Environmental Protection Agency (2017c). "PM-10 (1987) Nonattainment Area State/Area/County Report". <https://www3.epa.gov/airquality/greenbook/pncs.html#AZ>. Accedido 30 abril 2017.
- U.S. Environmental Protection Agency (2014). Water quality standards handbook. Office of Water. 820-B-14-008.

- U.S. Environmental Protection Agency (2009). Developing your stormwater pollution prevention plan. A guide for industrial operators. EPA 833-B-09-002. 1-42.
- U.S. Environmental Protection Agency (1998). The quality of our nation's waters, a summary of the National Water Quality Inventory: 1998 Report to Congress. EPA841-F-96-004G.
- U.S. Fish and Wildlife Service (2015). Section 404 Permits. Charleston Ecological Services. <https://www.fws.gov/charleston/404Permits.html>. Accedido 23 abril 2017.
- U.S. Geological Survey (2017a). "Sediment Data Portal Guide." <https://cida.usgs.gov/sediment/helpGuide.jsp>. Accedido 23 marzo 2017.
- U.S. Geological Survey (2017b). Sediment and Suspended Sediment. The effects of urbanization on water quality: Erosion and sedimentation. The USGS Water Science School. <https://water.usgs.gov/edu/sediment.html>. Accedido 23 marzo 2017.
- U.S. Geological Survey (2017c). USGS Sediment Data Portal. <https://cida.usgs.gov/sediment/>. Accedido 7 mayo 2017.
- U.S. Green Building Council (2017). Erosion and sediment control. LEED O+M: Existing Buildings. LEED 2.0. <http://www.usgbc.org/credits/existing-buildings/v20/ssp1>. Accedido 30 abril 2017.
- Utah Department of Environmental Quality. (2017). Utah Division of Air Quality. <https://deq.utah.gov/Divisions/daq/index.htm?id=l4>. Accedido 8 mayo 2017.
- Voigt, C.; Bozorth, T.; Carey, B.; Janes, E.; Leonard, S. (1997). "Sediment related issues and the public lands - Expanding sediment research capabilities in today's USGS - A bureau of land management overview". Proceedings of the U.S. Geological Survey (USGS) Sediment Workshop, February 4-7, 1997.
- Wolman, M. G. (1967). "A cycle of sedimentation and erosion in urban river channels". *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 49(2-4), 385-395.
- Wood, M. S.; Teasdale, G. N. (2013). Use of Surrogate Technologies to Estimate Suspended Sediment in the Clearwater River, Idaho, and Snake River, Washington, 2008-10. US Department of the Interior, US Geological Survey

Perspectivas del estado de los sedimentos en México

Felipe Arreguín Cortés (farreguin2011@gmail.com),
Margarita E. Preciado Jiménez (preciado@tlaloc.imta.mx),
Rafael Val Segura (rval@tlaloc.imta.mx), y
Maritza L. Arganis Juárez¹ (marganisj@iingen.unam.mx)

7.1. Introducción

El transporte de sedimentos en los ríos es un proceso continuo en la naturaleza; prueba de esto es su migración en los ríos formando y destruyendo bordos e islas, y provocando cambios de contorno en playas y costas. Estos procesos se originan con el inicio de movimiento de los sedimentos y su entrada en suspensión y arrastre de fondo, lo que produce erosión, transporte, deposición de partículas y su compactación y consolidación, que crea continuamente los paisajes.

La medición de sedimentos en México no se realiza de manera continua, debido principalmente a la falta de equipos y personal calificado para ello. Existen más de 4.462 presas y bordos registrados (Conagua, 2016). La pérdida del volumen útil en los vasos de almacenamiento limita la vida económica de las presas lo cual provocará en el futuro problemas en su operación y riesgos de inundación en zonas aledañas. Es indispensable identificar zonas con procesos erosivos, sus orígenes y la degradación de la capa de suelo en la cuenca para plantear soluciones a corto, mediano y largo plazo que mejoren la situación de las cuencas y alarguen la vida útil de las presas. La medición de los sedimentos en un río tiene muchas dificultades; unas provienen de la complejidad de los procesos de erosión, transporte y depósito dentro del propio cauce, y otras de los costos asociados con tales actividades.

7.2. Antecedentes

Para lograr una buena comprensión del funcionamiento de los ríos, es necesario cuantificar los sedimentos que son acarreados por el cauce, su tipo y tamaño, y la forma en que se distribuyen, ya que estos juegan un papel significativo en la estabilidad y escurrimiento en los mismos. Los ríos son elementos naturales que no pueden ser tratados como una estructura rígida e inerte de la ingeniería civil, como podría ser un puente o una carretera. El río tiene una dinámica fluvial y una interacción con el medio que lo ayuda a establecer un equilibrio natural con las condiciones hidráulicas y sedimentológicas que lo rigen. Así, cuando uno de estos componentes se altera, el río sufre un desequilibrio y tiende a modificar sus condiciones de escurrimiento, lo que trae como consecuencias cambios en su geometría que ocasionan en la mayoría de los casos inundaciones o afectaciones en sus márgenes.

En México la medición rutinaria en los ríos se hace con manuales que datan de los años 50, y aunque han sido actualizados (Conagua, 1998), tratan principalmente sobre el aforo de corrientes y la medición del gasto de lavado, es decir, el gasto sólido que se relaciona solamente con el material transportado cerca de la superficie. Este tipo de medición se justifica únicamente para algunas estaciones en la época de estiaje, cuando el transporte de fondo no es significativo. Sin embargo, no es útil en la época de avenidas donde se encuentran altas tasas de transporte de sedimentos de fondo. En general, no existen en México mediciones frecuentes del transporte de arrastre de fondo. Normalmente, se trata de inferirlo a partir de ecuaciones empíricas, que en la mayoría de los casos no son calibradas y subestiman o sobreestiman la capacidad real de transporte del río, o se intenta

inferir a partir de la carga en suspensión, lo cual implica errores graves, especialmente durante la época de avenidas cuando la carga de fondo es mucho mayor.

La medición de sedimentos tiene un alto valor para la gestión de los recursos hídricos. El número de estaciones hidrométricas que cuentan con registros de medición de sedimentos es de 398 (Conagua, 2018). Las redes de monitoreo hidrológicas se remontan al año de 1921. La medición de sedimentos se inició en el año 1946. De las 316 hidrométricas iniciales, 39 contaban con medición de sedimento en suspensión. El número de estaciones hidrométricas creció rápidamente de 389 en 1947 hasta 915 en 1964; después, más lentamente, hasta un máximo de 1.257 en 1980; durante esta década el número de estaciones fluctuó en alrededor de 1.200. Debido a diferentes factores, como la reducción de presupuesto, muchas estaciones hidrométricas, con laboratorio de sedimento, funcionan con solo un aforador sin ayudante, lo que afecta negativamente la recolección de datos de sedimentos (Ramírez, 2009).

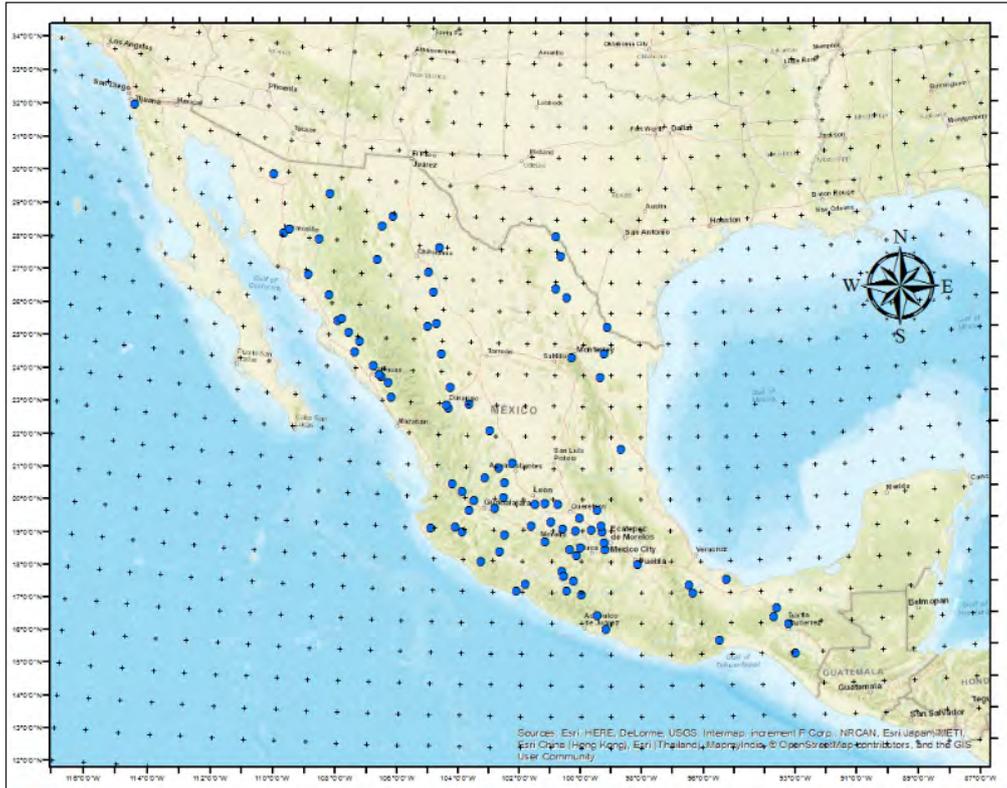
7.3. Las presas en México

El objetivo más común de una presa es regular los escurrimientos de un río, almacenando temporalmente el volumen que escurre en época de lluvias, para que sea usado durante la época de estiaje con múltiples propósitos, y para proteger de inundaciones a las poblaciones ubicadas aguas abajo. Por otra parte, ante la presión que ejerce el aumento de la demanda para todos los usos, originada por el crecimiento poblacional, el incremento de la productividad y la búsqueda de mejores niveles de vida resulta inadmisibles perder capacidad de almacenamiento en las presas, pues ello significa menor garantía para el abastecimiento e incluso la falla de la obra. En este contexto, es muy importante saber qué capacidad útil tiene cada embalse que lleva años en operación.

De las más de 4.462 presas registradas en México, 667 son clasificadas como grandes presas por definición, de acuerdo con los criterios de la Comisión Internacional de Grandes Presas. La principal función de las presas es el abastecimiento de agua para uso doméstico, industrial y agrícola, el control de avenidas y la generación de energía (Conagua, 2016).

La capacidad de almacenamiento al nivel máximo de agua ordinario (NAMO) de las presas del país es de aproximadamente 138.000 millones de metros cúbicos, y en las 100 presas más grandes (Figura 7-1), que representan el 85% del almacenamiento del país, se almacenan 94.000 millones de metros cúbicos (Conagua, 2016). Este volumen depende de la precipitación, los escurrimientos y la operación de las presas en las distintas regiones del país. En la Figura 7-2 (Arreguín y Murillo, 2013), puede apreciarse la distribución estatal de las principales presas en el país.

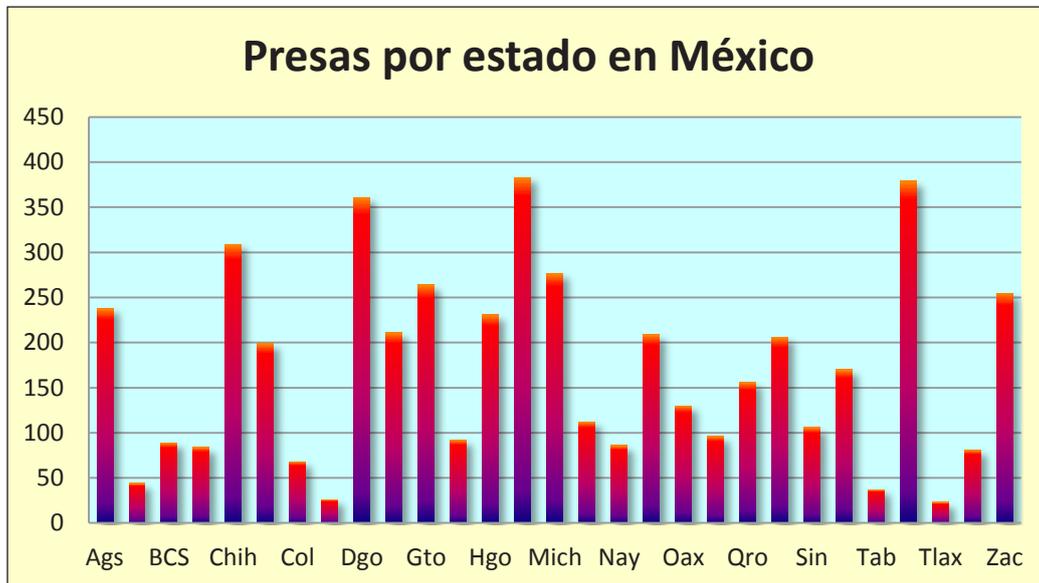
Figura 7-1. Cien principales presas de México



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Elaboración propia con datos e información de CONAGUA 2016.

Figura 7-2. Distribución de presas por entidad federativa



Nota: Los límites y los nombres que se muestran y las designaciones utilizadas en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Fuente: Elaboración propia en base a Arreguín y Murillo, 2013.

7.4. El azolvamiento de las presas

Las estimaciones globales sobre la erosión y el transporte de sedimentos en los grandes ríos del mundo presentan discrepancias importantes debido a la dificultad de obtener valores fiables de concentración y descarga de sedimentos. Existen recomendaciones prácticas que afirman que los embalses pierden anualmente entre el 0,5 y 1,0% de su almacenamiento. Ante la escasez de datos sobre sedimentos, las batimetrías resultan ser una práctica económica y confiable para obtener una aproximación numérica a la sedimentación ocurrida en cada embalse. Campos (2012) hizo un análisis del Diagrama Universal de Sedimentación en Embalses (DUSE) de Zhide Zhou, y concluyó que es una herramienta útil que permite llevar a cabo la regionalización de los sedimentos. En ese mismo estudio, el autor afirma que, en proyectos de gran visión y/o proyectos preliminares, se puede utilizar un valor de 0,0675 Hm³/año, como volumen probable de acumulación por sedimentos en presas pequeñas de la región noreste de México. Por otro lado, Gracia (2008) presenta un estimado de la tasa de sedimentación encontrando en la literatura para algunas presas mexicanas (Tabla 7-1).

Tabla 7-1. Tasa de sedimentación en algunas presas mexicanas

Embalse	RHA	Sedimentación (Hm ³ /año)
Caracol	Balsas	29,0000
Santa Rosa	Jerma Santiago Pacífico	9,0000
La Soledad	Balsas	0,8600
La Venta	Pacífico Sur	0,6000
Tuxpango	Golfo Norte	0,2200
Presas pequeñas en el noreste de México	Rio Bravo	0,0675

Fuente: elaboración propia con datos públicos de Internet de las Estadísticas del Agua en México, de la CONAGUA, 2010

La disminución de la vida útil de una presa, entre otras razones, es causada por la acelerada erosión de las cuencas de captación, que reduce la capacidad de almacenamiento de los vasos. Para conocer la cantidad de sedimentos que aportan las cuencas, así como el arrastre hacia las presas, es necesario identificar zonas con procesos erosivos, los orígenes del sedimento y la degradación de la capa de suelo necesaria para conservar la vegetación en la cuenca, entre otros fenómenos, para plantear soluciones a corto, mediano y largo plazo que alarguen la vida útil de los vasos de almacenamiento.

El acelerado azolvamiento que varias presas han sufrido en los últimos años puede asociarse al cambio en el uso de suelo, su erosividad ante las lluvias y la disminución de la cubierta vegetal. La carta de "Uso del suelo y vegetación" del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información (INEGI), muestra los grupos de vegetación en el territorio nacional. La serie I se generó en 1980-1990; la II, en 1993; la III, en 2002; la IV, en 2007; la V, en 2011-2012 y la VI, en 2015. Con la información disponible es posible efectuar la comparación que se presenta en la Tabla 7-2.

Como puede observarse (Tabla 7-2), la mayoría de los grupos de vegetación han sufrido disminuciones importantes, como los bosques de coníferas, encino y los mesófilos de montaña, considerados vegetación primaria. En la mayoría de los casos, el decremento en vegetación primaria está asociado con las actividades antropogénicas, además del incremento en la vegetación inducida y secundaria, así como las áreas agrícolas y urbanas.

Una de las causas principales en el deterioro de los suelos está exclusivamente ligada con las actividades agrícolas, específicamente con prácticas inadecuadas de producción. La agricultura contribuye en muchas formas a deteriorar la calidad del agua y a generar erosión y sedimentación, y es la causante de gran parte del aporte mundial de sedimentos a los ríos, lagos, presas y, finalmente, a los océanos.

Tabla 7-2. Cambio porcentual Uso de suelo y Vegetación Series I a la VI de INEGI

Grupo de vegetación o uso de suelo a nivel nacional	Cambio % (1980 a 2015)
Bosque de coníferas	-2,70
Bosque de encino	-1,25
Bosque mesófilo de montaña	-0,17
Matorral xerófilo	-1,59
Otros tipos de vegetación	0,05
Pastizal	-0,89
Selva caducifolia	-1,21
Selva espinosa	-2,09
Selva perennifolia	-1,74
Selva subcaducifolia	-0,23
Vegetación hidrófila	0,05
Sin vegetación aparente	0,09
Vegetación inducida	0,24
Vegetación secundaria	5,23
Agricultura	6,90
Zonas urbanas	0,85
Cuerpos de agua	-0,53

Fuente: Elaboración propia con datos e información de CONAGUA 2016.

Por otra parte, la construcción de nuevas presas y caminos suele dar lugar a actividades humanas a su alrededor que provocan cambios en el uso de suelo de distinta magnitud, ya sea por deforestación o por la creación de asentamientos humanos de forma desordenada. Según datos del Informe Anual 2016 de la Comisión Nacional Forestal, se ha identificado que la causa principal de la degradación de los suelos se debe a la deforestación asociada a los cambios en el uso de suelo y actividades agropecuarias que representan más del 50 % del área degradada en México. Entre las principales actividades que producen erosión pueden señalarse el riego excesivo, la quema de residuos de cosechas, el exceso de labranza y la falta de prácticas de conservación de suelo y agua (Ochoa-Cueva, 2015).

De las 100 presas mencionadas anteriormente, 79 se utilizan en el riego (Conagua, 2016). Cuarenta y cuatro de estas presas presentan problemas relacionados con los sedimentos, ya que se encuentran azolvadas más allá del nivel de aguas mínimas de operación (NAMINO). La edad promedio de estas obras es de 48,71 años, que casi corresponde a la vida útil que se considera en los horizontes de planeación para la evaluación económica de obras y de aprovechamiento. La reducción de la vida útil de una presa es causada por la acelerada erosión de las cuencas de aportación, con lo cual los vasos tienden a saturarse por acumulación de los sedimentos a tasas muy superiores a las previstas. La edad de las presas mencionadas anteriormente plantea el llevar a cabo una revisión de las políticas de mantenimiento en materia de azolve por sedimentos. En la Figura 7-3 se presenta la fecha de construcción de las principales presas de México.

Figura 7-3. Periodo de construcción de las principales presas de México



7.5. Políticas

En México no existe una normatividad para el control de sedimentos ni su manejo. De acuerdo con el anteproyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NMX-AA-121-SCFI-2005 “Aguas naturales epicontinentales, costeras y marinas – muestreo”, se define en su apartado 3.90 el concepto de sedimentos, definiéndolos como: “Partículas de suelo, arena y minerales llevados de la tierra al agua, generalmente después de la lluvia. Se acumulan en depósitos, en los ríos y los puertos; es el que modifica el hábitat de peces y fauna bentónica y enturbian el agua impidiendo que la luz del sol alcance a las plantas acuáticas”. En su apartado 10.6 habla del muestreo de sedimentos, pero no hace referencia a una norma oficial mexicana anterior, respecto a la forma de medirlo. En la Sección Quinta titulada “Temporal tecnificado” del proyecto de Decreto de Ley de Aguas Nacionales, se menciona en el artículo 161 que la “Comisión” brindará la asesoría técnica necesaria a los beneficiarios de los distritos de temporal tecnificado, tomando como base las unidades de temporal tecnificado que se identifiquen y, en su caso, de las áreas de las cuencas que afecten la infraestructura con aportaciones de agua y sedimentos.

7.6. El futuro de la investigación en torno a los sedimentos

Actualmente, no existen soluciones definitivas para el control de los azolves en las presas, pero existen medidas estructurales y no estructurales que pueden contribuir a minimizar los procesos de azolvamiento en las presas, y evitar la reducción del volumen útil o atenuar los efectos ambientales derivados.

Se han desarrollado procedimientos para reducir el efecto de la sedimentación, por ejemplo, el “sluicing”, que consiste en no almacenar agua durante los meses de mayor arrastre de sedimentos, lo cual es poco aplicable en regiones donde los meses de precipitación son reducidos. Otro método es el “flushing” que consiste en operar el desagüe de fondo o la obra de toma, de tal forma que pueda arrastrar los sedimentos cercanos a ellas, también con resultados muy limitados. Un procedimiento es la extracción mecánica (dragado), que actualmente es muy cara y aplicable solo en casos excepcionales y existe una forma de reducir el impacto del azolve mediante la construcción de sistemas desarenadores que, en general, también son opciones costosas.

En materia de diseño, para mitigar esta situación se utilizan tres tipos de herramientas:

- Empírica, basada en fórmulas que dan una idea aproximada del problema, utilizadas desde hace 60 años.
- Modelos numéricos, basados en las peculiaridades del flujo, simulan cómo se mueven estas acumulaciones a través de las estructuras de contención. Existen en la literatura diferentes planteamientos, entre ellos está la línea de investigación usando el cómputo evolutivo que utiliza los datos de estaciones hidrométricas que cuentan con mediciones de sedimentos haciendo correlaciones de sus datos anuales y mensuales entre el gasto sólido y gasto líquido aplicando técnicas de programación genética (Preciado *et al.*, 2012).
- Modelos físicos, una versión a escala del prototipo de embalse. Este tipo de herramienta puede dar la característica tridimensional del flujo, así como estudiar los problemas de erosión del cuerpo del embalse, ya que este problema se ve agravado por la antigüedad de las presas.

De igual manera, se han desarrollado metodologías para la predicción del gasto sólido a partir del gasto líquido medido en una estación hidrométrica; haciendo uso de programación genética se ha podido encontrar una correlación entre ambos. En esta línea de investigación, es necesario llevar a cabo más pruebas y estudios que permitan, dado el caso, poder hacer una regionalización de acuerdo con el tipo y uso de suelo y la cantidad de gasto líquido entre otras características fisiográficas de los cauces.

La aplicación de medidas no estructurales puede ayudar a reducir los problemas de sedimentos en las presas. No cabe duda de que la prevención aplicada a un proceso como el azolvamiento, que es de manifestación probabilística, de efectos no inmediatos y referidos a unas obras que se proyectan para una vida media de unos 50 a 150 años, requiere una buena dosis de concientización, dado que en caso contrario corre el riesgo de considerarse irrelevante o simplemente innecesaria. La prevención en materia de azolvamiento de presas se puede aplicar a dos niveles, uno sobre el medio productor de sedimentos promoviendo y minimizando la producción y movilización de sedimentos y, el otro, a nivel de la propia obra hidráulica, maximizando el control sobre el paso de los sedimentos por el vaso de la presa.

El punto de partida de cualquier propuesta de medida preventiva es disponer de información sobre el aspecto objeto de estudio. En el caso del azolvamiento de presas, esta necesidad de información debe iniciarse en el conocimiento de las tasas de erosión real de las cuencas donde se encuentran o donde se proyecta su construcción, de aquí la importancia de las mediciones. La localización de las zonas productoras de sedimentos, su control mediante obras de conservación y corrección mediante una correcta recuperación, mantenimiento de la cubierta forestal y de obras específicas, son aspectos claves en la reducción de la producción de sedimentos y en la conservación de la vida útil de las presas y funcionalidad del corredor fluvial. En este sentido, cabe señalar que la eficacia de la restauración hidrológico-forestal puede recuperar todos los estratos de vegetación. Junto con la localización de las zonas productoras de sedimento, resulta también importante conocer la naturaleza mineral de ese sedimento, ya que sus efectos son sustancialmente distintos según el tipo de sedimento.

A una menor escala, se han estudiado los efectos sobre el ciclo de sedimentos, dada la importancia que tienen los fenómenos de erosión del suelo y de su depósito, el equilibrio dinámico del ciclo de los sedimentos, que en una cuenca puede ser modificado por diversos factores, como el clima, acciones antropogénicas, presas y la creciente urbanización en donde se tienen una gran superficie impermeable, las prácticas agrícolas intensivas y el cambio en el uso de suelo, todos factores primordiales a tomarse en cuenta en un programa de control de sedimentos. El cambio climático, en combinación con las actividades humanas intensivas, acarrea una serie de graves problemas relacionados con los grandes sistemas fluviales, tales como el aumento de la precipitación,

provocando mayor erosión, sedimentos, grandes riesgos climáticos a escala como sequías e inundaciones, y disminución o aumento de caudal de los ríos en la estación seca, lo que indica que existe una marcada correlación entre las precipitaciones medias anuales de una cuenca y la tasa de generación de sedimentos anuales (Francés y Bussib, 2014).

7.7. Conclusiones

La medición de sedimentos es un problema hídrico al que debe darse un seguimiento detallado debido a la gran cantidad de ríos (633.000 km) y presas existentes en México, que tienen un papel vital en la transformación y modernización del país. La reducción del volumen útil en el almacenamiento de los vasos limita la vida económica de las presas, lo cual provocará problemas en la operación, además de riesgos de inundación en zonas ubicadas aguas abajo. Las redes de medición se han ido deteriorando, afectando negativamente la calidad de la recolección de datos de sedimentos y disminuyendo significativamente el número de estaciones que realizan medición de sedimentos, lo que conlleva a modelar este fenómeno con un alto grado de error.

Actualmente, no existen soluciones definitivas para el control de los azolves en las presas. Existen medidas estructurales y no estructurales que pueden contribuir a reducir los procesos de azolvamiento en las presas y limitar la reducción del volumen útil o atenuar los efectos ambientales derivados.

La localización de las zonas productoras de sedimentos, su control mediante obras de conservación, corrección y mantenimiento de estructuras captadoras de sedimentos, son aspectos clave en la reducción de la producción de sedimentos y en la conservación de la vida útil de las presas y funcionalidad del corredor fluvial.

Se deben promover estudios de manejo integrado de cuencas, de ordenamiento territorial, conservación de suelos y desarrollo de nuevas tecnologías conservacionistas para tierras en laderas, uso de biotecnologías y, por supuesto, la reforestación. Los proyectos de embalses deben contemplar la producción y movilización de sedimentos en las cuencas, con la finalidad de adoptar diseños adecuados para atenuar los efectos de la sedimentación en dichos embalses, especialmente en cuencas con tasas significativas de erosión.

En las próximas décadas, las presas van a sufrir una pérdida de capacidad significativa por la cantidad de sedimentos que están llegando a sus vasos. Según las previsiones, el volumen de sedimentos se duplicará para el año 2050 con respecto al volumen de sedimentos estimado actualmente. Es importante realizar una labor de control y seguimiento de la evolución de los sedimentos en las presas.

Puede establecerse un control del volumen de sedimentos almacenado en un embalse cada diez años, así como controles después de crecidas extraordinarias. Los resultados de estos controles sirven para analizar las desviaciones respecto a lo previsto en la fase de proyecto, para calibrar modelos y obtener previsiones sobre el grado de colmatación. Es necesario contar con una legislación que regule el control de azolves y de las presas orientada a los titulares y concesionarios de grandes presas, será importante en el futuro.

Es prioritario tener una gestión adecuada de los aportes de sedimentos en las zonas y en los embalses donde se depositan. En cada caso concreto habrá que definir las actuaciones más adecuadas. Si la cuenca del embalse está muy degradada, puede ser necesario proceder a su restauración, realizando, si fuera necesario, obras complementarias aguas arriba para la protección del embalse. Si la cuenca está poco degradada y bien protegida frente a la erosión, las actuaciones deberán concentrarse en el propio embalse y en la posible reutilización del sedimento.

Conocer las tasas de erosión de las cuencas, localizar las zonas productoras de sedimentos, medir el transporte de sedimentos y su distribución en el vaso de embalse, es prioritario para poder llevar a cabo la planeación de proyectos y hacer un análisis costo-beneficio sobre las posibles medidas preventivas y/o estructurales aplicables en cada caso particular. En las estrategias de medición hacia

el futuro, se propone hacer una revisión a los procedimientos de adquisición de datos y programas de mantenimiento de equipo, y llevar a cabo procesos de certificación y supervisión periódica de las campañas de medición tanto de aforo líquido como sólido. Procedimientos para reducir el efecto de la sedimentación como el “sluicing”, el “flushing” o la extracción mecánica (dragado), actualmente son muy caros y aplicables solo en casos excepcionales. Otra forma de reducir el impacto del azolve es la construcción de sistemas desarenadores que, en general, también son opciones costosas.

7.8. Referencias bibliográficas

- Arreguín-Cortés, F. I.; Murillo-Fernández R.; Marengo-Mogollón H. (2013). “Inventario nacional de presas”. *Tecnología y Ciencias del Agua* 4(4): 179-185.
- Campos-Aranda, Daniel Francisco (2012). Resultados de 35 batimetrías de la región centro-noreste de México, según el Diagrama Universal de Sedimentación en Embalses de Zhide Zhou *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 3, julio-septiembre de 2012, pp. 163-173. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n3/v3n3a12.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (1998). *Instructivo para el aforo de corrientes*. Subdirección General de Administración del Agua, GASIR. México, DF. 223 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2018). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016). SEMARNAT, Atlas del Agua en México, disponible en: http://201.116.60.25/publicaciones/AAM_2016.pdf
- Francés, F.; Bussib, G. (2014). “Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido”. *Ribagua*, 1(1), 14-25.
- Gracia Sánchez, Jesús (2008). “Sedimentación en embalses”. Memorias. Primer Seminario de Potamología “José Antonio Maza Álvarez”. IMTA. 19 al 21 de noviembre 2008.
- Ochoa Cueva P. A.; Iñiguez Armijos (2015). “El papel de la cobertura vegetal en la generación de sedimentos y calidad del agua de los Andes Ecuatorianos”. IV Jornadas de Ingeniería del Agua La precipitación y los procesos erosivos. Córdoba, 21 y 22 de octubre 2015.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales parecía detallar más los detalles de Sólidos suspendidos totales y de Sólidos sedimentables. Disponible en: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf>
- Preciado, Jiménez M.; Arganis, J. M. L.; Val, S. R.; Ocón, A. A. (2010). “Visión actual de la situación en la medición y efectos de los sedimentos en embalses de México. *Memorias del XXI Congreso Nacional de Hidráulica*, Guadalajara, Jalisco, octubre 2010.
- Preciado, J. M, Arganis, J. M. L.; Val, S. R.; y Ocón, A. (2012). “Estimación del acarreo de sedimentos de la cuenca del río Apatlaco usando cómputo evolutivo”. *Revista Internacional de Ciencias de la Tierra. Mapping Interactivo* 01 de febrero 2012. http://www.egeoconsulting.com/mapping/index.php?option=com_content&view=article&id=1870:estimacion-del-acarreo-de-sedimentos-de-la-cuenca-del-rio-apatlaco-usando-computo-evolutivo&catid=67:edicion-151-2012&Itemid=164 ISSN: 1131-9100
- PROY-NMX-AA-121-SCFI-2005 (2005). Aguas naturales epicontinentales, costeras y marinas-muestreo. Disponible en: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/nmx-AA-05/proy-nmx-aa-121-scfi-2005.pdf>
- Ramírez León, J. M. (2009). “Producción de sedimentos en cuencas: Revisión de criterios y aplicabilidad a la cuenca del Río Apulco”. Tesis de Maestría. División de Estudios de Posgrado UNAM.

Perspectivas del estado de los sedimentos en Perú

Kelvin Reyes¹ (kreyes@domusperu.com), **Joel Fernández**²(joelm.fernandeze@pucp.edu.pe),
Carlos Llerena (Q.E.P.D)³ (callerena@lamolina.edu.pe), **Jesús Cardozo**⁴(jesus.cardozo@andex.com.pe),
 y **Godofredo Rojas**⁵ (gorova@hotmail.com)

8.1. Introducción

A lo largo de su historia, el Perú ha sufrido una serie de eventos naturales extremos que han desencadenado grandes pérdidas de infraestructura (Carreño & Kalafatovich, 2005) y vidas humanas. Debido a su ubicación en la zona intertropical de Sudamérica, entre la línea del Ecuador y el Trópico de Capricornio, el Perú presenta la mayoría de los microclimas del mundo, lo que le permite poseer gran diversidad de recursos naturales y a la vez una mayor susceptibilidad ante la variabilidad climática. Las condiciones geográficas y climáticas que presenta esta parte de América, como por ejemplo su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, la presencia de la Cordillera de los Andes y el Anticiclón del Pacífico intensifican los procesos morfodinámicos, tales como los procesos de erosión y sedimentación (PCM, 2014).

Los Andes Tropicales y el fenómeno El Niño inducen la presencia de tormentas convectivas en las zonas áridas, principalmente en la región costa. En este período, en la zona norte del país, entre Tumbes y Lambayeque, se eleva la temperatura superficial del mar y los caudales de los ríos de la costa norte y central presentan registros por encima de sus promedios históricos. Caso contrario sucede con la costa sur y en la vertiente del Titicaca (región Sierra). En esta época, los ríos del sur y de la vertiente del Titicaca registran valores por debajo del promedio histórico. De acuerdo con fuentes históricas, los eventos de El Niño de 1983 y 1998 fueron los más severos ocurridos en la costa norte del país (García-Herrera *et al.*, 2008). Recientemente, a inicios del 2017 se evidenció el fenómeno llamado El Niño Costero el cual provocó la pérdida de muchas vidas humanas e infraestructura a causa de los procesos de erosión en masa y de la fuerte actividad de los procesos erosivos de partículas debidos a las intensas lluvias y al incremento de los caudales de los ríos. No obstante lo mencionado, el poder erosivo de las aguas es singular en la región de la Selva peruana debido a sus intensas lluvias y sus caudalosos ríos.

Asimismo, la desglaciación que se ha evidenciado en los últimos años ha contribuido a la formación de lagunas en las partes altas que están amenazando a las poblaciones que ocupan las principales quebradas y pies de monte de la región andina. Estos procesos de desglaciación podrían desencadenar en un futuro cercano aluviones, avalanchas de tierra y roca que afectarían a la población y a las principales actividades económicas que se realizan en esta región. Además, la escasez de estudios y obras de ingeniería ante el peligro de estos desastres limitarían la generación de planes de mitigación en eventos extremos. A esto se le suma la posibilidad de ocurrencia de un sismo severo que podría afrontar la costa peruana y generaría una gran devastación nacional.

Por otro lado, la cuenca amazónica ha registrado altas tasas de deforestación. De acuerdo con Soares-Filho *et al.* (2006), cerca del 15% de bosques amazónicos han sido arrasados desde el año 1970. La pérdida de los bosques amazónicos se debe principalmente a la agricultura migratoria, a la expansión de cultivos comerciales (por ejemplo, café, cacao, palma aceitera, entre otros), la extracción forestal, la actividad ganadera y la minería ilegal. Considerando que

1 Domus Consultoría Ambiental.

2 Pontificia Universidad Católica del Perú.

3 Universidad Nacional Agraria La Molina.

4 Andex del Norte S.A.

5 Instituto de Promoción para la Gestión del Agua.

estas actividades se localizan en áreas de alta pendiente, han generado altas tasas de erosión, pérdidas de nutrientes y reducción del secuestro de carbono (Gonzales & Llanos, 2015).

En los últimos años ha habido algunos intentos de cubrir la brecha en el estudio de los sedimentos y los procesos que hay detrás de estos. Sin embargo, existe un largo camino para estar a la vanguardia en el control de la erosión y de la sedimentación en el país. El año 1997 el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) elaboró un mapa de erosión de los suelos del país. Una actualización reciente data del año 2017, donde el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) elaboró el Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú (SENAMHI, 2017) empleando datos de información meteorológica y productos de sensoramiento remoto de alta resolución para establecer mapas de erosión desde el año 1981 al 2014. No obstante lo mencionado, aún persiste un déficit de estudios orientados a cuantificar la producción de sedimentos de manera integral que actualice los mapas hacia años más recientes e incluya los efectos de cambio climático. Ello conlleva a encontrar pocas soluciones exitosas con un enfoque de control de erosión y sedimentación a lo largo en todo el país.

En este escenario, el presente capítulo trata de contextualizar el estado actual del estudio de los sedimentos en el país. El objetivo de esta revisión es dar a conocer los avances que se han venido desarrollando en el campo de los sedimentos y a la vez concientizar la necesidad de conectar la ciencia con la ingeniería mediante el uso del conocimiento científico del riesgo existente en zonas vulnerables del Perú. Además, poner énfasis en la importancia del estudio de los sedimentos en la adaptación al cambio climático, la gestión de riesgos y la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas.

8.2. Revisión bibliográfica

Los estudios sobre los procesos de erosión y sedimentación en el Perú son escasos principalmente por el desinterés del gobierno en políticas enfocadas a un estudio integral de las cuencas hidrográficas. Los pocos intentos en la investigación de los sedimentos han sido desarrollados por parte de la academia, por medio de investigaciones o tesis de pre y posgrado considerando todo el país (Low, 1966; Paulet, 1966; Llerena, 1988) o alguna localidad de sus tres regiones naturales (Ledesma, 1971; Alegre, 1979; Felipe-Morales *et al.*, 1979; Boulange *et al.*, 1981; La Torre, 1985; Ormachea, 1991; Ormachea & Llerena, 1992; López, 1998; Inbar & Llerena, 2000; Velásquez, 2002; Alemany, 2004; Inbar & Llerena, 2004; Llerena *et al.*, 2004; Roncal, 2006; Yataco, 2007; Cortez & Huamaní, 2008; Quispe, 2018; Escobar, 2019), revisando la información disponible y aplicando métodos desarrollados en otros países. Una descripción de métodos tradicionales y locales fue presentada por Llerena (1987), en el simposio de la IAHS sobre erosión y sedimentación en el anillo del Pacífico (Beschta *et al.*, 1987). Muchos estudios se han centrado en las cuencas amazónicas y andinas debido a su relevancia para el país. Es importante señalar que la escasez de información y la insensata confidencialidad por parte de las instituciones que regulan el acceso a la información de estos estudios, han impedido que se generen nuevas investigaciones, en base a lo ya avanzado. De acuerdo a las referencias bibliográficas encontradas, se han dividido estos estudios en cuatro secciones, las cuales en conjunto engloban el estudio integral de los sedimentos. Estas secciones tienen que ver con los sedimentos en suspensión; con la erosión y la deposición de sedimentos; con el control de la erosión y la sedimentación; y con la utilización de los sedimentos aguas abajo.

8.2.1. Estudio integral de los sedimentos suspendidos

Llevar a cabo estudios relacionados a la cuantificación de los sedimentos ha sido un gran reto para el país. De acuerdo con Morera *et al.* (2013) el desarrollo de la hidro-sedimentología representa un desafío en el Perú debido a los datos limitados y la información confidencial. Morera *et al.* (2013) en un trabajo conjunto con el Laboratorio de Geociencias Ambientales de Toulouse y el Instituto

Geofísico del Perú desarrollaron la investigación “Pertinent spatio-temporal scale of observation to understand suspended sediment yield control factors in the Andean region: The case of the Santa River (Peru)” con el objetivo de cuantificar y entender la producción de sedimentos suspendidos a lo largo de los andes oeste-centro e identificar los principales factores que controlan la erosión.

La metodología del estudio desarrollado por Morera *et al.* (2013) se centró en el entendimiento de los factores que controlan la magnitud y frecuencia de la producción de sedimentos suspendidos desde los andes centro-occidentales hasta la costa del pacífico. Para ello se estimó las diferencias espaciales de la producción de sedimentos a una escala de cuenca, se determinó los factores no climáticos que producen erosión y se introdujo la relevancia de la resolución de los mapas para definir los factores de erosión en los Andes. De acuerdo con los resultados obtenidos por Morera *et al.* (2013) se identificaron a las actividades mineras en litologías específicas como el principal factor que controla la producción de sedimentos suspendidos. Asimismo, Morera *et al.* (2013) remarcó la necesidad del uso de datos satelitales a una escala de kilómetros, registros de descargas diarias y series de tiempo de concentración de sedimentos suspendidos para definir los principales factores de erosión a lo largo de toda la cordillera de los andes.

Por otro lado, Armijos *et al.* (2013) realizó un estudio en colaboración con el Instituto Nacional de Investigaciones de la Amazonía de Brasil (INPA) y el Servicio de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) denominado “Suspended sediment dynamics in the Amazon River of Peru”. El objetivo de este estudio fue desarrollar un análisis profundo para una longitud de datos de 7 años de registros en la red de estaciones que se encuentran en la Amazonía peruana para estimar la carga de sedimentos de los principales ríos de la cuenca alta del Amazonas con un enfoque de variabilidad temporal. De acuerdo con Armijos *et al.* (2013), la erosión y el transporte de los sedimentos nos permiten entender la evolución de la corteza, el cambio climático y los ciclos biogeoquímicos de los contaminantes y nutrientes. En ese contexto, el estudio de la cuenca amazónica entre las laderas andinas y las llanuras es de gran relevancia debido a sus características fisiológicas y climáticas.

Es así como desde el año 2003 el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IDR) en convenio con el SENAMHI y la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) crearon el observatorio ORE-Hybam. Este observatorio ha realizado mediciones en 8 puntos estratégicos en la cuenca amazónica con la finalidad de entender y modelar los sistemas, dinámica y comportamiento de la cuenca. De acuerdo con los resultados obtenidos por Armijos *et al.* (2013) en este estudio, la producción de sedimentos suspendidos en las laderas de los andes son gobernados por un modelo simple que relaciona la descarga del río y la concentración de sedimentos. Sin embargo, para la zona de llanuras existe un efecto de dilución de las concentraciones de sedimentos, las cuales crean histéresis en esta relación mensualmente. Asimismo, la producción de sedimentos en la cuenca amazónica en el Perú se estimó en $541 \times 10^6 \text{ t año}^{-1}$, de donde el 70% es provisto por la cuenca sur. Anteriormente Guyot *et al.* (2007) estimó $450 \times 10^6 \text{ t año}^{-1}$ el total de sedimentos suspendidos que Perú exporta a Brasil a través de los Ríos Napo, Marañón y Ucayali.

Recientemente, Morera *et al.* (2017) en un trabajo cooperativo con el Instituto Geofísico del Perú (IGP), la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) y la Universidad de Grenoble Alpes en Francia desarrollaron un estudio que compila una base de datos de la producción de sedimentos suspendidos en Perú. Este estudio denominado “The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968-2012)” tiene por objetivo determinar la relación del incremento de la producción de sedimento suspendido anual durante los Eventos de El Niño Extremo (EENE). Morera *et al.* (2017) indica que el cambio climático es considerado como uno de los principales factores que controlan los flujos de sedimentos en cadenas montañosas. No obstante, el efecto de El Fenómeno El Niño sobre la erosión fluvial y el transporte de los sedimentos en los Andes Occidentales no han sido estudiados de manera integral. Para este estudio, se utilizaron un conjunto de datos de 1968 al 2012, en donde se compararon la producción de sedimentos suspendidos anuales durante los EENE con respecto a años normales.

Los resultados arrojaron que el incremento de la producción de sedimentos suspendidos anuales se encuentra en el rango de 3 - 60 veces durante los EENE. Asimismo, en estos años cerca de 82% a 97% de la producción de sedimentos suspendidos ocurren entre enero y abril. Esto se debe principalmente al aumento repentino de la descarga de agua de los ríos a causa de las altas tasas de precipitación y la capacidad de transporte durante los EENE. Morera *et al.* (2017) señala que el efecto de los EENE en la producción de los sedimentos suspendidos depende de la topografía, registrándose los valores máximos en las cuencas ubicadas en el norte del país con una curva hipsométrica cóncava hacia arriba y los valores mínimos en la zona sur con curvas hipsométricas cóncavas hacia abajo.

Es importante señalar que a nivel de las universidades se vienen implementando proyectos enfocados en la estimación de la producción de sedimentos. La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) viene desarrollando una serie de investigaciones orientadas al estudio de la erosión y sedimentación. En un estudio reciente, desarrollado por Rosas & Gutierrez (2016, 2019) se determinó el volumen de sedimentos hacia el año 2030 para los andes peruanos. Para ello, se construyó un modelo de cambio de cobertura de suelo, el cual está basado en mapas de uso de suelo de 1990, 2000 y 2010. Este modelo predice tres escenarios: escenario normal, escenario con actividad minera y escenario con presencia de áreas protegidas. Los resultados obtenidos por Rosas & Gutierrez (2016, 2019) muestran un volumen de producción de sedimentos de 2.115 t/año para la cuenca del Amazonas y 932 t/año para la cuenca del Pacífico para el año 2030.

8.2.2. Estimación de la erosión y deposición de sedimentos

En el campo de la cuantificación de la erosión aún existe una gran brecha de estos estudios. Con el apoyo de la Universidad de Cincinnati de los Estados Unidos, Londoño (2008) determinó los patrones y procesos de erosión inferidos de las terrazas agrícolas incaicas en el sur del Perú con la finalidad de estimar las tasas de erosión. De acuerdo con Londoño (2008), la morfología inicial y actual proporcionan una base ideal para desarrollar y probar modelos de erosión a largo plazo. En ese sentido, las terrazas agrícolas incaicas abandonadas desde el año 1532 d.C. aproximadamente en las zonas áridas del sur del Perú pueden ser utilizadas para documentar los cambios morfológicos desde su abandono.

Para ello, la metodología empleada para determinar los patrones y las tasas de erosión desde el año 1530 al 2005 se realizó mediante la comparación de los modelos de elevación de la morfología observada con respecto a los modelos reconstruidos de la morfología original de las terrazas incaicas. Los resultados obtenidos por Londoño (2008) muestran que en zonas con acumulación de sedimentos la elevación de la superficie se incrementó hasta en un 0,5 m. Para el caso de la disminución de la elevación en las bandas de las terrazas, se redujo hasta 0,7 m como máximo con una tasa de disminución promedio de 0,094 mm/año. De acuerdo con estos hallazgos, Londoño (2008) resalta la importancia del estudio de áreas perturbadas en el sur del Perú puesto que proporcionan información sobre cómo se produce la tasa de erosión en entornos áridos donde el recurso suelo es escaso y propenso a desertificación.

En años recientes, Rosas & Gutierrez (2016, 2019) desarrollaron un estudio enfocado en la cuantificación de la erosión hídrica en el Perú. En este estudio, se desarrolló un mapa de erosión hídrica mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE). Para ello, se desarrolló una metodología para la estimación de la erosión de los suelos a una escala nacional. Los mapas de erosión de suelos fueron desarrollados para los años 1990, 2000 y 2010 con una resolución de 5 km.

Asimismo, Fernandez-Espinoza & Gutierrez (2018) estimaron el factor de la erosividad de las lluvias y los parámetros de erodibilidad para la cuenca del río Rímac. Los factores de erosividad y erodibilidad son indicadores ampliamente utilizados para determinar un potencial riesgo de erosión hídrica. En este estudio se desarrolló un mapa de erosividad de lluvias para la cuenca del río

Rímac en la costa central del Perú a partir de registros de precipitación diaria. Además, mediante ensayos de erosión por chorro (JET) en las riberas del río Rímac se estimaron los parámetros de erodibilidad (esfuerzo cortante crítico y coeficiente de erodibilidad). Los resultados obtenidos por Fernandez-Espinoza & Gutierrez (2018) muestran que los valores más altos de estos parámetros se obtuvieron en la parte alta de la cuenca, en donde se registran las precipitaciones de mayor intensidad.

8.2.3. Prácticas de manejo para el control de la erosión y sedimentación

Una clasificación bastante usada en Perú para definir los métodos de control de la erosión a nivel de partículas y de masas que considera tanto los métodos tradicionales como los modernos, propone las siguientes alternativas: mecánico-estructurales (diques, muros, geomembranas, zanjas de infiltración, andenes, etc.), forestales-agrostológicos (cobertura de bosques o pastos), agronómico-culturales (rotación de cultivos, surcos en contorno, labranza mínima, *mulching*, etc.) y una combinación de estos (hidrosiembra). Algunos de estos métodos se pueden observar en las Figuras 8-1 y 8-2.

Adicionalmente podemos mencionar que el uso de geosintéticos (Geoweb™) con cobertura vegetal mediante hidrosiembra es una técnica desarrollada e investigada en operaciones mineras de gran escala, observable en las Figuras 8-3 y 8-4 (Reyes, 2008).

Sobre procesos de erosión en masa, en un trabajo desarrollado por Valderrama (2001) en colaboración con el Centro de Investigación Sísmica y Mitigación de Desastres de la Universidad Nacional de Ingeniería, se analizó la alteración de la morfología fluvial debido a la modificación de los ríos de la selva peruana. De acuerdo con Valderrama (2001), se espera que la construcción de muelles fluviales en la selva baja del Perú cause problemas de erosión y sedimentación. Esto se debe principalmente a que la remoción de la vegetación puede inducir el desprendimiento de la capa delgada superficial del suelo en donde crece vegetación. Fueron trabajos pioneros los desarrollados por Kalliola *et al.* (1987) y Kalliola (1982) en la Amazonia para ver la relación entre la geomorfología fluvial del río Ucayali, la sucesión vegetal y la erosión ribereña. Estos estudios fueron luego continuados por Velásquez (2002). Asimismo, las precipitaciones intensas y la escorrentía superficial pueden limpiar completamente los nutrientes del suelo.

En ese contexto, Valderrama (2001) propuso que la solución planteada para el control de erosión y sedimentación ribereña tiene que ser comparable con la construcción de métodos usados y también con la vegetación, materiales y mano de obra disponible. Además, como parte de este trabajo se presentó un enfoque de diseño el cual se podrá encontrar el artículo publicado. En consecuencia, se espera el monitoreo de las condiciones durante y después de los trabajos de construcción de la alternativa de control de erosión.

Figura 8-1. Reforestación y estaquillados de madera para la recuperación de laderas en la región Selva



Fuente: Archivo de Domus Consultoría Ambiental S.A.C./Kelvin Reyes).

Figura 8-2. Estabilización de ladera con Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L. Roberty) para la protección de infraestructura hidráulica en la región Costa



Fuente: Archivo de Domus Consultoría Ambiental S.A.C./Kelvin Reyes.

Figura 8-3. Aplicación de mezcla de hidrosiembra en la región Andina



Fuente: Archivo Domus Consultoría Ambiental S.A.C. /Kelvin Reyes.

Figura 8-4. Resultados de hidrosebrado en la región Andina



Fuente: Archivo Domus Consultoría Ambiental SAC / Kelvin Reyes.

8.2.4. Utilización de los sedimentos aguas abajo

En los últimos años, la represa Gallito Ciego localizada en la cuenca del río Jequetepeque en el noroeste de Perú se ha estado llenando de sedimentos. En ese sentido, en un trabajo conjunto de Walter *et al.* (2012) con la Universidad Técnica de Berlín en Alemania y la Pontificia Universidad Católica del Perú realizaron el estudio “An assessment of sediment reuse for sediment management of Gallito Ciego Reservoir, Peru”. De acuerdo con Walter *et al.* (2012), la gran cantidad de sedimentos en esta represa está conduciendo a que no se logre almacenar el agua adecuada para la irrigación agrícola. Cerca del 70% del volumen de agua estancada representa el volumen de sedimentos acumulados, lo cual conlleva al bloqueo de la salida del fondo del reservorio. Con base en ello, el objetivo del estudio desarrollado por Walter *et al.* (2012) fue evaluar las posibilidades de la gestión de sedimentos para el uso agrícola en la cuenca del río Jequetepeque. El enfoque metodológico implicó la recolección de muestras de sedimentos en zonas litorales y profundas del reservorio. También se recolectó sedimento suspendido, con la finalidad de obtener parámetros físicos, concentraciones de nutrientes y metales pesados.

Se llevó a cabo una evaluación potencial de la aplicación de sedimentos en áreas de cultivo mediante la comparación de la distribución del tamaño de las partículas, contenido de nutrientes y concentraciones de contaminantes de los sedimentos. Los resultados obtenidos por Walter *et al.* (2012) en investigaciones de la textura de los sedimentos profundos muestran una fuerte clasificación del tamaño de las partículas con el reservorio. Por otra parte, las concentraciones de los metales pesados en los sedimentos, así como las concentraciones de nutrientes estuvieron debajo de los límites tóxicos. Por lo tanto, se desprende que el uso de los sedimentos para propósitos agrícolas no constituiría riesgo alguno. Además, este uso representa un valor económico importante como enmienda de suelo y materiales de construcción. Es importante señalar que el dragado y uso de estos sedimentos debe verse como un componente del manejo integral de los sedimentos en la cuenca del río Jequetepeque.

8.3. Políticas

En la normativa peruana existen algunas leyes y políticas orientadas a regular el control de la erosión y el manejo de los sedimentos. Sin embargo, estas leyes y políticas son limitadas y no se cuenta hasta la fecha con una norma integral que involucre el control de erosión y sedimentos en el país. A continuación, se presentan las leyes y políticas vigentes que se han desarrollado, las cuales constituyen el primer paso hacia una norma integral de control de erosión y sedimentos.

Ley N.º 30.557: “Ley que declara de interés nacional y necesidad pública la construcción de defensas ribereñas y servidumbres hidráulicas”

Esta ley fue publicada recientemente en el diario *El Peruano* el 6 de mayo del 2017 y describe lo siguiente:

- **Artículo 1:** Declaración de interés nacional y necesidad pública de la construcción de defensas ribereñas y servidumbres hidráulicas.

“Declárese de interés nacional y necesidad pública la construcción de defensas ribereñas y servidumbres hidráulicas, bajo el enfoque de planificación nacional y de integración del ordenamiento territorial de las cuencas hidrográficas del territorio nacional, teniendo como base los criterios de sostenibilidad, prevención y adaptación al cambio climático; con la finalidad de proteger a los pobladores de las inundaciones y desbordes provocados por la crecida de los ríos”.

- **Artículo 2:** Coordinación y disposición de recursos por parte del poder ejecutivo.

“El poder ejecutivo coordinará con los gobiernos regionales y gobiernos locales la identificación y priorización de las actividades y obras para cumplir con lo dispuesto por el artículo precedente. El poder ejecutivo podrá disponer de los recursos necesarios para la vigencia de la presente ley, incluyendo los recursos del fondo de contingencia”.

Esta ley y los artículos descritos anteriormente buscan la priorización de proyectos de defensa ribereña con la finalidad del control de erosión y sedimentos y a la vez proteger a la población ante la ocurrencia de eventos extremos en el país como es el caso del Fenómeno El Niño. No obstante, sigue pendiente la incorporación de una norma integral que involucre la ejecución de proyectos de defensa ribereña con la investigación científica, de tal forma que se obtengan soluciones sostenibles en el tiempo.

Ley N.º 30.191: “Ley que establece medidas para la prevención, mitigación y adecuada preparación para la respuesta ante situaciones de desastre”

- **Artículo 3:** De las acciones en materia de prevención, mitigación y adecuada preparación para la respuesta ante situaciones de desastre.

“Medidas en materia de agricultura: Gastos para la ejecución de proyectos de inversión de defensa ribereña, para el tratamiento de cuencas altas para reducción de riesgos, para el mantenimiento y consolidación de cauces, drenajes, para el control de las fajas marginales de los ríos, entre otros en relación al Fenómeno El Niño”.

Ley N.º 29.338: “Ley de Recursos Hídricos”

Esta ley establece la protección del agua, faja marginal en los terrenos aledaños a los cauces naturales o artificiales con la finalidad de protección del uso primario del agua, el libre tránsito, la pesca, caminos de vigilancia u otros servicios. En ese contexto, la Autoridad Administrativa del Agua en coordinación con el Ministerio de Agricultura, gobiernos regionales, locales y organizaciones de usuarios del agua promoverán el desarrollo de programas y proyectos de forestación en las fajas marginales para la protección contra la acción erosiva de las aguas. La Ley N.º 30.640 modifica esta ley agregando el reconocimiento de zonas ambientalmente vulnerables a las cabeceras de cuenca donde se originan los cursos de agua de una red hidrográfica.

8.3.1. Reglamentos vigentes

Como parte de los reglamentos de protección ambiental vigentes en diversos sectores económicos en el país, se ha hecho énfasis en el estudio y medidas de erosión y sedimentación que involucran estas actividades productivas. Por ejemplo, el sector de transportes y comunicaciones en el Decreto Supremo N.º 004-2017-MTC señala la necesidad de medidas de protección de los recursos hídricos para el control de escorrentía de lluvia, sedimentos y erosión dentro del instrumento de gestión ambiental. Asimismo, en el sector de energía y minas en el Decreto Supremo N.º 039-2014-EM se indican, como medidas para la construcción de plataformas de perforación en tierra en actividades de hidrocarburos, un estudio detallado de la geotecnia los cuales deben incluir la estabilidad de los taludes y el control de erosión y sedimentación. Para el sector agrario, de acuerdo con el Decreto Supremo N.º 019-2012-AG se pone en manifiesto la conservación de los suelos y laderas, el control de la erosión, deterioro, salinización y pérdida de fertilidad. Finalmente, para las actividades mineras, en el Decreto Supremo N.º 042-2017-EM, se expresa la necesidad de controlar las aguas de escorrentía mediante el establecimiento de barreras de sedimentación en canales y cunetas para el control de la velocidad del agua, minimizar la erosión y el arrastre de sedimentos.

Este conjunto de leyes y normas vigentes, las cuales son muy limitadas para un país muy diverso como el Perú, carecen de una conexión con la investigación científica. Estas leyes y políticas

presentan un enfoque más de ejecución que de un análisis más profundo del problema, que busquen soluciones integrales y sostenibles en el tiempo. Hace unos pocos años el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) ha tratado de reorientar la investigación científica a los problemas de interés nacional con la finalidad de buscar su aplicación con una sólida base científica. Sin embargo, surge la necesidad de buscar un enfoque integral, en donde la ciencia y la priorización de proyectos vayan de la mano. Si bien, esta forma de trabajo se presenta como un gran reto en el campo del estudio de los sedimentos, con el trabajo que viene realizando el CONCYTEC es posible encontrar importantes resultados en el futuro.

8.4. Servicios ecosistémicos, cambio climático y el futuro de la investigación y políticas en torno a los sedimentos

Un nuevo concepto que ha tenido una incorporación reciente son los Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos (MRSE), el cual ha sido recogido por la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS) mediante la R.C.D. N.° 045-2017-SUNASS-CD a través de la Directiva de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos Hídricos donde las Empresas Prestadoras de los Servicio Saneamiento incorporan el MRSE en la tarifa o incorporación de ajustes de aquellos beneficios directos o indirectos que se obtienen del buen funcionamiento de los ecosistemas tales como la regulación hídrica en cuencas, control de sedimentos, entre otros.

El cambio climático tiene gran repercusión en el estudio de los procesos de erosión y sedimentación. Perú, debido a su ubicación geográfica y condiciones climáticas, es altamente vulnerable a la erosión. Esta pérdida del suelo es uno de los principales factores en los procesos de degradación y desertificación a nivel mundial. A esto se le suma que Perú se caracteriza por su variabilidad climática y topográfica, influenciada por el Fenómeno El Niño y la cordillera de los Andes. Estas dos condiciones hacen crecer el interés del estudio de los sedimentos en el país y a la vez lo dificultan, ya que el nivel de predictibilidad no es exacto en condiciones complejas como las presenta Perú.

Algunas proyecciones basadas en modelos globales han señalado que Perú enfrentará variaciones en sus patrones de precipitación debido al procesos de calentamiento global (Vuille *et al.*, 2008). Esto conllevará a que los procesos de erosión y sedimentación se intensifiquen. En ese contexto es importante que las políticas que se desarrollan en el país deben estar concientizadas en esta realidad. Estudios enfocados en la mitigación de la producción de sedimentos producto del resultado de las actividades humanas deben ser correctamente geo-referenciadas.

Es importante resaltar la reciente adopción de Perú al Programa para el Desarrollo de las Naciones Unidas Post-2015, titulado “La transformación de nuestro mundo: La agenda 2030 para el desarrollo sostenible”, la cual está estrechamente relacionada a la erosión de los suelos. Como objetivo 15 hacia el 2030, se señala proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación del suelo y frenar la pérdida de la diversidad biológica (United Nations, 2015). Todo este marco acrecienta la necesidad de desarrollar estudios de erosión y sedimentación bajo las condiciones propias de Perú y con un adecuado acompañamiento de leyes y políticas que busquen soluciones integrales. En ese sentido ha sido promulgada la Ley Marco Sobre Cambio Climático, Ley N.° 30754 y su reglamento (D.S. N.° 013-2019-MINAM). La ley considera como medidas de mitigación al cambio climático la protección, conservación y manejo sostenible de los bosques; la forestación y la reforestación, el control del uso y cambio del uso del suelo entre otros.

8.5. Agradecimientos

Los autores agradecen a las instituciones del estado por su apoyo con el requerimiento de información concerniente a políticas y leyes enfocadas al estudio de los sedimentos y la erosión. Asimismo, agradecemos a la Pontificia Universidad Católica del Perú, Universidad Nacional Agraria

La Molina y la Universidad Nacional de Ingeniería por su apoyo con la obtención de investigaciones orientadas al estudio de los sedimentos. Finalmente, agradecemos a la UNESCO por la motivación y apoyo en la realización de investigaciones enfocadas en conocer la realidad actual del estudio de los sedimentos en países latinoamericanos.

8.6. Referencias bibliográficas

- Alegre, J.C. (1979). Medida de la erosión hídrica de un entisol de la selva alta (San Ramón, Chanchamayo) bajo diferentes sistemas de cultivo. Tesis M. Sc. UNALM, La Molina, Lima.
- Aleman, N. C. (2004). Erosión hídrica y usos de la tierra en la cuenca del río Llamaquizú, Oxapampa, Perú. Trabajo de Fin de Carrera de Lic. Ciencias. Ambientales, EPSG, Universidad Politécnica de Valencia - UNALM, La Molina, 45 pp. + anexos.
- Armijos, E.; Crave, A.; Vauchel, P.; Fraizy, P.; Santini, W.; Moquet, J. S.; ... Guyot, J. L. (2013). Suspended sediment dynamics in the Amazon River of Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 44, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.09.002>.
- Beschta, R.L.; Blinn, T.; Grant, G.E.; Swanson, F.J.; & Ice, G.G. (1987). Erosion and sedimentation in the Pacific rim. *Publicación IAHS N.º 165*, 510 pp.
- Boulangé, B.; Vargas, C.; & Rodrigo, L. A. (1981). Le sadimentatrion actuelle dans le Lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. Trop.* 14: 299-309.
- Carreño, R & Kalafatovich, S (2006). *The Alcamayo and Cedrobamaba catastrophic debris flow (January, March and April 2004) in Machupicchu area-Peru*. Landslides. Springer-Verlas.
- Cortez, M. & Huamaní, A. (2008). *Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica del suelo en terrazas de una cancha de desmonte revegetada en Huancavelica, Ciclo Optativo Gestión de Calidad y Auditoría Ambiental*, Vice Rectorado Académico, UNALM, La Molina.
- Felipe-Morales, C.; Meyer, R.; Alegre, J.C. & Vitorelli, C. (1979). Losses of water and soil under different cultivation systems in two Peruvian locations Santa Ana (Central Highlands), and San Ramón (Central High Jungle) 1975-1976. *Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics*: 489-499. Edits.: R. Lal & D. J. Greenland. J. Wiley & Sons.
- Fernandez-Espinoza, J. M.; Gutierrez, R. R. (2016). *Estudio cuantitativo de la erosión hídrica en contextos de limitada información: Caso de estudio cuenca del río Rímac*. Catálogo Bibliográfico PUCP. Lima.
- Escobar, M. (2019). Mitigación de la erosión hídrica para la conservación del suelo en la subcuenca del río Ichu, Huancavelica. Tesis M.Sc. EPG-UNALM, 151 pp.
- García-Herrera, R.; H. F. Díaz, R. R. García, M. R. Prieto, D. Barriopedro, R. Moyano & E. Hernández (2008). A chronology of El Niño events from primary documentary sources in Northern Peru. *Journal of climate*. Vol. 21. pp. 1948-1962.
- Gonzales, Carlos A. and Llanos Romina. (2015). *Evaluación de los efectos de la deforestación en la hidrología y pérdida lateral de carbono orgánico del suelo de la cuenca del Alto Mayo*. Departamento de Geografía y Geología de la Universidad de Turku, Finlandia. Lima.
- Guyot, J; Bazan, H; Fraizy, P, Ordonez, J, Armijos, E & Laraque, A. (2007). Suspended sediment yields in the Amazon basin of Peru: A first estimation. *Water Quality and Sediment Behaviour of the Future: Predictions for the 21st Century*.
- Inbar M.; Llerena C.A. (2000). Erosion Processes in High Mountain Agricultural Terraces in Peru. *Mountain Research and Development* 20 (1): 72-79.
- Inbar M.; Llerena C.A. (2004). Procesos Erosivos y Abandono de Andenes. En: *Conservación y Abandono de Andenes*, Llerena, C.A.; Inbar, M. y Benavides, M. editores, UNALM-Universidad de Haifa, Lima, pp. 141-148.

- INRENA (1997). *Mapa de erosión de los suelos del Perú* [mapa]. Catálogo Bibliográfico PUCP. Lima (accessed may 5, 2018).
- Kalliola, R. (1992). Abiotic control of the vegetation in Peruvian Amazon floodplains: environment change and pioneer species, *Reporte N.º 30 Departamento de Biología*, Universidad de Turku, Disertación Académica (6 artículos).
- Kalliola, R.; Salo, J. & Makinen, Y. (1987). Regeneración natural de selvas en la amazonia peruana 1: dinámica fluvial y sucesión ribereña, *Memorias del Museo de Historia Natural "Javier Prado" N.º 18*, UNMSM, Lima, 102 pp. + 2 anexos
- La Torre, B. (1985). Efecto del sistema de cultivo sobre la escorrentía erosión y pérdida de nutrientes en un entisol de la Selva Alta, CAP José Santos Atahualpa, San Ramón, Chanchamayo, Tesis M.Sc.; EPG-UNALM, La Molina, 147 pp.
- Ledesma, A. (1971). Algunas medidas de control de la erosión hídrica adaptables a la zona del Mantaro en el Perú. Tesis Ing. Agrícola. UNALM, La Molina, Lima.
- Llerena C.A. (1988). Uso de varillas para medir erosión hídrica. *Revista Forestal del Perú* 15 (2): 47-56.
- Llerena C.A.; Inbar M.; Benavides M. (editores, 2004). *Conservación y Abandono de Andenes*, UNALM -Universidad de Haifa, Lima, 220 p.
- Londoño, A. C. (2008). Pattern and rate of erosion inferred from Inca agricultural terraces in arid southern Peru. *Geomorphology*, 99(1-4), 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.09.014>
- López, C.D. (1998). Procesos de erosión hídrica en andenes abandonados de la Comunidad campesina de San Juan de Iris, Lima, Tesis M.Sc. EPG-UNALM, La Molina, 178 pp. + anexos.
- Low, F. (1966). Soil Erosion due to rainfall in Peru. In: First Pan-American Soils conservation congress: 211-219. Sao Paulo.
- Morera, S. B.; Condom, T.; Crave, A.; Steer, P.; Guyot, J. L. (2017). The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968-2012). *Scientific Reports*, 7(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12220-x>
- Morera, S. B.; Condom, T.; Vauchel, P.; Guyot, J. L.; Galvez, C.; Crave, A. (2013). 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(11), 4641-4657. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4641-2013>
- Ormachea, R.A. (1991). Uso de la tierra y erosión hídrica en el bosque húmedo tropical de Dantas, Huánuco, Tesis Ing. Forestal, UNALM, La Molina, 147 pp.
- Ormachea M.; Llerena C. A. (1992). Erosión hídrica en el bosque húmedo tropical de Dantas. *Revista Forestal del Perú* 19 (1): 19-34.
- Paulet, M. (1966). Significado agro-económico de la erosión en el Perú. In: First Pan-American soil conservation congress: 503-510. Sao Paulo.
- PCM (2014). Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - PLANAGERD 2014-2021. Sistema Nacional de Gestión de Desastres. *Dirección General del Departamento de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Unión Europea*. Lima.
- Quispe, T. (2018). Influencia de la cobertura vegetal en la erosión hídrica del suelo en la comunidad de San Mateo. Tesis M. Sc. EPG-UNALM, 66 pp.
- Reyes, K. (2008). Evaluación de cuatro tratamientos de revegetación mediante hidrosiembra en la mina Yanacocha. Tesis M. Sc.; EPG-UNALM, 77 pp.
- Roncal, W. (2006). Influencia de las plantaciones forestales sobre la escorrentía superficial y la erosión hídrica en Porcón, Cajamarca, Perú. Tesis M. Sc.; EPG-UNALM, 138 pp.
- Rosas, M. A. y Gutierrez, R.R. (2016). Cuantificación de la erosión hídrica en el Perú y los costos ambientales asociados. Catálogo Bibliográfico PUCP. Lima.

- Rosas, M. A. & Gutierrez, R.R. (2019). Assessing soil erosion risk at natural scale in developing countries. The technical challenges, a proposal methodology in a case history. *Science of the Total Environment*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719354671?via%3Dihub>
- SENAMHI (2017). Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú. Nota Técnica 002 Dirección de Hidrología. Lima, Perú. 130 pp.
- Soares-Filho B. S.; Nepstad D.C.; Curran L. M.; Cerqueira G.C.; Garcia R. A.; Ramos C.A.; Voll E.; McDonald A.; Lefebvre P.; Schlesinger P. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, pp. 520-523.
- United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. United Nations Sustainable Development Summit 2015 (p. 41 pages). New York: sustainabledevelopment.un.org.
- Valderrama, A. M. (2001). Streambank Erosion Control in the Lower Jungle of Peru. *Bridging The Gap*, 1. doi:10.1061/40569(2001)160
- Velásquez, D.F. (2002). Estudio de la Dinámica Fluvial del Río Ucayali y su Influencia en la Sucesión Forestal en el Área de Pucallpa, Tesis M. Sc.; EPG-UNALM, 138 pp.
- Vuille, M.; Francou, B.; Wagnon, P.; Juen, I.; Kaser, G.; Mark, B.; & Bradley, R. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 79-96.
- Walter, K.; Gunkel, G.; & Gamboa, N. (2012). An assessment of sediment reuse for sediment management of Gallito Ciego Reservoir, Peru. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 17(4), 301–314. <https://doi.org/10.1111/lre.12008>
- Yataco, A. (2007). Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica utilizando varillas en suelos con plantaciones forestales y pastos, C.C. Yuracmayo. Tesis M. Sc.; EPG-UNALM, La Molina.

Perspectivas del estado de los sedimentos en Uruguay

Mario Pérez-Bidegain (mperezb@fagro.edu.uy), **Fernando García-Préchac** (fgarciap@fagro.edu.uy), y **Christian Chreties** (chreties@fing.edu.uy)

9.1. Introducción

Este capítulo presenta el estado actual de la erosión hídrica en Uruguay, mostrando la perspectiva histórica de la problemática, el desarrollo del conocimiento científico local como pilar de las políticas públicas, la política de conservación de suelos y las futuras investigaciones científicas en la materia. Asimismo, se presenta una breve descripción del estado actual sobre sedimentología fluvial en Uruguay, focalizando en la problemática, el desarrollo científico y las futuras investigaciones como herramientas para el desarrollo de políticas. El capítulo se divide en dos partes, en la primera parte se presenta la temática de erosión hídrica y, en la segunda, la temática sobre sedimentología fluvial.

9.2. Erosión hídrica en Uruguay

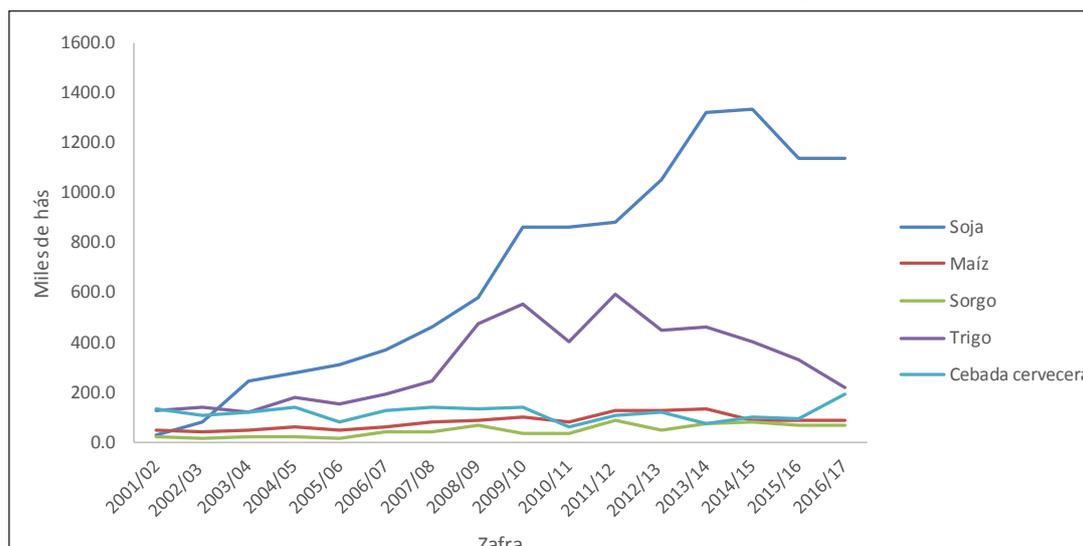
La erosión de suelos es reconocida por la Alianza Mundial por los Suelos (FAO-ITPS, 2015) como la primera amenaza para los suelos a nivel global. Como consecuencia de la erosión, se estima una pérdida anual de 0,3% de rendimientos de los cultivos, y si el ritmo actual se mantiene, alcanzará el 10% para 2050. Por otra parte, las tasas de erosión anual de las tierras cultivadas y por sobrepastoreo se estima que son entre 100 y 1.000 veces mayor a la erosión natural. La erosión de los suelos no solo tiene como consecuencia la pérdida de capacidad productiva del suelo erosionado, sino que los sedimentos generados tienen efectos en lugares fuera del sitio en cuestión. Dentro de estos efectos se pueden mencionar, por ejemplo, la contaminación de los cursos de agua, la colmatación de embalses o la eutrofización de lagos y lagunas. En Uruguay, la erosión hídrica es señalada como uno de los principales problemas ambientales fuera de los sitios urbanos (Sganga *et al.*, 2005) y como factor determinante de la reducción de la capacidad productiva de los suelos en el país (García-Préchac y Durán, 1998).

El objetivo de esta sección del capítulo se concentra en reseñar la experiencia de Uruguay en cuanto a la generación de conocimiento científico local para lograr su mitigación, así como la articulación de este con las políticas públicas en materia de conservación de suelos. Este enfoque no ignora los efectos de la erosión fuera del sitio, pero dicho aspecto es abordado en otras secciones.

9.2.1. Historia de la erosión en Uruguay

Uruguay ha experimentado importantes cambios en sus sistemas de producción. Los dos más destacados son la forestación para uso comercial a partir de los años 90 y el importante aumento de áreas bajo cultivos anuales, predominantemente de verano y en particular de soja, desde comienzo del presente siglo (Figura 9-1). En la década del 50, se dio una gran expansión en la agricultura, momento en el cual se llegó a plantar alrededor de 1,5 millones de hectáreas de cultivos (Arbeletche *et al.*, 2010), principalmente trigo (cultivo de invierno).

Figura 9-1. Evolución del área de cultivos para granos



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de DIEA (2009 y 2017).

El proceso de los años 50 y la historia anterior de uso y manejo de los suelos de Uruguay, generaron gran parte de la erosión de los suelos del país que aún se evidenciaba a fines del siglo XX. Por otra parte, la expansión agrícola desde el comienzo de este siglo se dio sobre suelos con más riesgo de degradación que los usados históricamente. Asociado a la expansión agrícola, el principal cambio que genera el nuevo sistema de producción consistió en la sustitución de la rotación de cultivos y pasturas (RCP), por cultivos continuos (CC). Los beneficios para el suelo de la RCP, en cuanto a reducir las tasas de erosión de suelos y mejorar su calidad, así como otorgar a los sistemas productivos mayor poder amortiguador frente a variaciones climáticas y económicas, son avalados por información experimental nacional de largo plazo (García Préchac *et al.*, 2004; Ernst y Siri-Prieto, 2009). Un análisis en profundidad de las causas y los efectos de la erosión en los sistemas agrícolas se puede encontrar en Pérez Bidegain *et al.* (2010).

9.2.2. Conocimiento científico local como pilar de las políticas públicas

A comienzos de la década de los años 80, la legislación de conservación de suelos se actualizó y los servicios oficiales de investigación iniciaron un programa para validar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978). Esta herramienta sería empleada como la guía técnica de toma de decisiones para seleccionar las mejores prácticas de uso y manejo de suelos. Este esfuerzo de investigación local está justificado, ya que USLE es un modelo empírico y no puede usarse en un lugar en donde las condiciones climáticas, edafológicas y de uso y manejo sean distintas al ambiente en el cual se desarrolló.

Este programa de investigación y validación de la USLE se llevó a cabo, con intermitencias, desde 1980 a 2001, por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) y la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (FAGRO). Como consecuencia de este trabajo interinstitucional, se logró validar la USLE y desarrollar un *software* denominado EROSIÓN 6.0. Este *software*, basado en la USLE y RUSLE, y desarrollado para las condiciones de Uruguay, es de distribución gratuita entre técnicos, productores, e investigadores.

9.2.3. Política de conservación de suelos en Uruguay

En 1968, el Parlamento de la República aprobó la primera Ley de Conservación de Suelos (N.º 13 667); pero no se aplicó hasta 1980, cuando un grupo de trabajo del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) la revisó y propuso modificaciones. Como consecuencia de este trabajo, se aprobó la ley N.º 15 239 en 1981. Ambas leyes se basan en el principio de que la conservación del suelo y el agua son de interés general, lo que, de acuerdo con la Constitución de la República Oriental del Uruguay, supera cualquier interés particular. Por lo tanto, la regulación puede limitar lo que propietarios y arrendatarios de tierras pueden hacer con los suelos en sus unidades productivas. La ley determina que el MGAP es la autoridad que dicta la normativa técnica sobre la conservación del suelo y el agua superficial, y también fiscaliza su cumplimiento. La normativa técnica debe ser aplicada por los tenedores de tierras a cualquier título. Fue definida por resoluciones del MGAP en 1990, 2004 y 2008. En 2009, el Parlamento aprobó la ley N.º 18 564, que establece que cuando el tenedor de la tierra no es su propietario, este último es responsable solidario con el arrendatario en caso de violación de la reglamentación. El espíritu de esta norma se basa en la premisa de que el propietario de la tierra sea el primer administrador de la conservación del suelo. Este cambio fue provocado por el hecho de que la gran mayoría de la agricultura del país es realizada por personas que no son propietarias de la tierra. Además, la reglamentación prevé multas para el caso de aquellos que no la cumplan.

Las normas técnicas para evitar la erosión hídrica son diversas, por ejemplo: evitar realizar las actividades de preparación del suelo en sentido de la máxima pendiente, o aplicar herbicidas totales en zonas de concentración de escurrimientos que favorecen la formación de cárcavas. Sin embargo, la principal norma técnica establecida en 2008 es que cada unidad de manejo de suelos (chacra, lote o parcela) debe tener presentado un plan de uso y manejo del suelo (PUMS). El período del plan es igual al período de la rotación completa de cultivos que se van a hacer en el futuro inmediato.

Un PUMS consiste en un polígono georreferenciado, una descripción de la rotación de cultivos (sistema de uso del suelo) o cultivos-pasturas, todos los detalles del manejo del suelo, los rendimientos proyectados de los diferentes cultivos, el suelo dominante y las características topográficas del lugar (largo e inclinación de la pendiente). Con toda la información indicada, se debe hacer una estimación de la erosión media anual del suelo con el programa EROSIÓN 6.0 (basado en la USLE y RUSLE) y presentarla al MGAP, demostrando que la pérdida de suelo estimada no es mayor que la máxima pérdida de suelo tolerable establecida oficialmente para el suelo usado. La presentación del PUMS es en línea (no presencial) y el trabajo técnico para su elaboración debe ser realizado por un ingeniero agrónomo.

El ingeniero agrónomo responsable, contratado por el arrendatario y/o propietario de la tierra para la elaboración de un PUMS, debe estar acreditado oficialmente. Para lograr la acreditación, debe aprobar un examen específico de uso y manejo del suelo, administrado y elaborado por la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República de Uruguay. Este proceso de acreditación surge de un acuerdo firmado entre el MGAP, la Asociación de Ingenieros Agrónomos del Uruguay y la Universidad de la República. El trabajo profesional de los ingenieros agrónomos acreditados está bajo el escrutinio de un consejo ético y técnico, integrado por miembros de las tres instituciones.

Una vez que el PUMS fue presentado, la división especializada en Suelos y Agua del MGAP puede llevar a cabo su fiscalización, tanto en sus aspectos técnicos como de su cumplimiento. La presentación de PUMS es obligatoria desde 2013. Sin embargo, antes hubo tres años de trabajo de extensión y capacitación para productores y agrónomos. Este trabajo de extensión consistió en cursos cortos, talleres y trabajos de campo en casos seleccionados, que incluyeron desde el estudio de la información de antecedentes hasta la visita al campo y el ejercicio de elaboración de un PUMS. Esta fue una etapa crítica en el proceso que condujo a los buenos resultados que se presentarán.

Al final del año agrícola 2015-16, más del 95% (1.513.679 ha) de las tierras agrícolas uruguayas presentaron e implementaron los PUMS, lo que se considera un éxito relativo a la mitigación de la erosión del suelo y los impactos ambientales colaterales de la escorrentía.

Algunos aspectos claves a destacar de esta interacción entre conocimiento científico-tecnológico y política pública, son los siguientes. La ley general indica quién es la autoridad ejecutiva y los sujetos pasibles de contralor. La autoridad puede cambiar la normativa técnica de conservación del suelo cuando sea necesario (por ejemplo, debido a cambios tecnológicos agrícolas), a través de resoluciones del Poder Ejecutivo o del MGAP. Esta política se basa en el castigo de las violaciones normativas y no utiliza incentivos monetarios. Los PUMS presentados tienen carácter de declaración jurada y pueden ser fiscalizados en cualquier momento por la autoridad para verificar su cumplimiento. El responsable técnico de la elaboración de un PUMS es un ingeniero agrónomo acreditado con ejercicio libre de la profesión. Por último y más importante es que los PUMS se elaboran antes de actuar en el campo, lo que significa que la política tiene una intención preventiva. En base a lo anterior, se espera que el estado de las propiedades principales del suelo se preserve en el futuro.

También cabe destacar que este proceso fue el resultado del asesoramiento solicitado por el Gobierno a la comunidad científica agronómica con el objetivo de implementar una política pública basada en el conocimiento científico. También, esta política pública está alineada con la aplicación de las Mejores Prácticas de Manejo propuestas en la *Guía Voluntaria de Manejo Sustentable de Suelos* (FAO, 2017) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

9.2.4. Futuros trabajos en materia de erosión hídrica

La política en conservación de suelos y su base en conocimiento científico requieren una permanente actualización de la información empleada. En este sentido, cabe destacar la actualización que se ha hecho de los valores de erosividad de la lluvia que emplea el programa EROSIÓN 6.0 (Pérez-Bidegain, *et al.*, 2017) y la corrección de las estimaciones por contenido de agua en el suelo (García-Préchac *et al.*, 2017). Con el objetivo de mejorar la toma de decisiones por parte de productores, técnicos y gobernantes, existen líneas de trabajo en desarrollo que buscan ajustar y validar modelos basados en procesos como los son RUSLE y WEPP (Jorge *et al.*, 2015).

Además de los trabajos de investigación vinculados a la erosión de suelos y su modelación, el país cuenta con una plataforma de ensayos de larga duración que están siendo empleados para ajustar y validar otros indicadores vinculados al manejo y conservación del recurso suelo (García-Préchac *et al.*, 2018). Estos indicadores tienen que ver con la evolución del carbono orgánico del suelo, gases de efecto invernadero y calidad y salud del suelo.

9.3. Transporte y manejo de sedimentos en cursos de agua de Uruguay

La mayor parte de los cursos fluviales de Uruguay son de tipo aluvial, discurriendo en terrenos de bajas pendientes y presentando importantes planicies de inundación, acordes con el régimen hidrológico presente en las cuencas. En muchos de ellos, el sedimento presente en el lecho, conformado fundamentalmente por arenas, tiene importante valor comercial, especialmente para la industria de la construcción. A modo de ejemplo, los ríos Negro, Cuareim, Santa Lucía, San Salvador, Uruguay y de la Plata presentan las características antes mencionadas.

Este interés comercial se ha traducido en la necesidad de regular a nivel nacional la extracción de áridos en cursos fluviales. Es así como el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), a través de la Dirección Nacional de Hidrografía (DNH), es la autoridad competente en materia de sedimentología fluvial y, en particular, en el otorgamiento de permisos de extracción de materiales de los cauces, costas, riberas y orillas correspondientes al Océano Atlántico y ríos, arroyos y lagos del territorio nacional. Estas competencias fueron trasladadas al MTO desde la Dirección Nacional de Catastro, a partir del decreto del Poder Ejecutivo del 16 de octubre de 1962. En dicho decreto, se establece la reglamentación tanto para extracciones con destino a consumo interno como para exportación. Posteriormente, a través de un decreto del Poder Ejecutivo del 28 de octubre de 1969,

se reglamenta el otorgamiento de permisos para extracción de arena y/o canto rodado subacuático con destino a la exportación, derogando la parte correspondiente del decreto anterior. Establece la intervención preceptiva de la DNH en toda obra o extracción de materiales en los álveos de dominio público dentro del territorio nacional. Esto es reafirmado tanto en el Código de Aguas (ley 14 859 de 1978), como en el artículo 96 de la ley 15 851 (1986). Esta última ley plantea la autorización al MTOP a conceder directamente, por el canon vigente, permisos precarios y revocables de extracción de áridos subacuáticos, siempre que sean otorgados en forma no excluyente (Chreties, 2012).

9.3.1. Conocimiento científico local como pilar de las políticas públicas

Las actividades de extracción de áridos del lecho y/o márgenes de los cursos fluviales pueden provocar cambios hidrosedimentológicos del curso a escala local, aunque si la extracción es muy significativa, estos cambios pueden repercutir a mayor escala. Desde el punto de vista hidrodinámico, el cambio topográfico del lecho o sus márgenes afecta directamente la distribución de velocidades en una sección, con los consecuentes cambios en la capacidad de transporte de sedimento. El balance sedimentológico en el río varía potencialmente, y el sistema busca un nuevo estado de equilibrio hidrosedimentológico, diferente al original. El impacto de estos cambios puede identificarse en la zona de la extracción, pero también aguas arriba, aguas abajo y en una margen u otra. Por lo tanto, la no regulación/control de las extracciones puede traer consecuencias e impactos en distintas escalas temporales y espaciales del sistema fluvial.

El comportamiento hidrosedimentológico de un curso fluvial y, por lo tanto, los impactos potenciales antes mencionados, están condicionados en buena medida por las características del sedimento del lecho y márgenes, la cuenca de aporte y el régimen hidrodinámico del curso, además del tipo y magnitud de extracción. En consecuencia, las características locales de funcionamiento del curso aluvial son claves a la hora de representar el comportamiento sedimentológico. Esto pone de manifiesto la importancia del desarrollo de conocimiento local de las variables intervinientes para generar herramientas que permitan contribuir a la implementación de políticas de manejo de sedimentos en ríos.

En este sentido, diversos convenios entre la Dirección Nacional de Hidrografía (DNH-MTOP) y también la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA-MVOTMA) con la Universidad de la República (Facultad de Ingeniería), han permitido un avance significativo en esta temática en los últimos 20 años, cuyos resultados se ven reflejados en las siguientes publicaciones: Teixeira *et al.*, 2008; Alonso *et al.*, 2008; Chreties y Teixeira, 2013; Chreties *et al.*, 2014; Vilaseca y Chreties, 2016; Vilaseca *et al.*, 2018.

La estrategia de trabajo desarrollada en los estudios antes referidos ha tenido dos componentes fundamentales. Por un lado, el desarrollo e implementación de modelos numéricos hidrológicos-hidrodinámicos-sedimentológicos, a efectos de intentar representar los principales procesos que gobiernan el comportamiento del río. Sin embargo, las formulaciones existentes en dichos modelos para el cálculo del transporte de sedimentos, surgidas fundamentalmente en laboratorios físicos, presentan niveles de incertidumbre muy importantes al ser aplicadas en casos reales. De ahí la necesidad de complementar este desarrollo con programas de monitoreo del transporte de sedimento por fondo, que permitan un análisis crítico de las formulaciones y su ajuste a las condiciones locales. En ese contexto, se cuenta con algunos antecedentes de medidas puntuales, y muy aisladas, de transporte por fondo, como es el caso del río Cuareim (Vilaseca y Chreties, 2016), río Yaguarón y río Uruguay, todas realizadas con muestreadores de fondo puntuales.

Frente a esta situación de escases en materia de medidas de campo y la relevancia de las mismas, la DNH-MTOP junto con el IMFIA de la Facultad de Ingeniería, vienen desarrollando un estudio piloto en la cuenca del río Santa Lucía, que tiene por objetivo la implementación de diversos sistemas de monitoreo de transporte de sedimentos por fondo. La información obtenida en este programa de monitoreo permitirá ajustar una o más formulaciones para la estimación de transporte, herramienta de base para la comprensión, gestión y manejo de los sedimentos en cursos.

El programa de monitoreo integra diferentes técnicas, entre las que se destacan: a) construcción de trincheras y programas de relevamientos batimétricos de las mismas; b) monitoreo en base a un muestreador de fondo US-BL84, empleado para caudales medios desde un puente o pasarela (Figuras 9-2 y 9-3); y c) ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) empleado en condiciones de caudal medio y superiores, donde no es posible medir con el muestreador de fondo. Este instrumento, además de medir perfiles de velocidades de los cursos de agua, permite relevar la velocidad de pasaje de las formas de fondo, relativa a la posición del instrumento y, sobre esa base, es posible estimar el transporte por fondo. Este programa de monitoreo se encuentra en su etapa inicial, operando en forma efectiva desde este año 2018, y ya se han colectado las primeras tres medidas de transporte por fondo.

Figura 9-2. Muestreador de fondo tipo US-BL84, utilizado por el IMFIA para el transporte por fondo de cursos fluviales.



Fuente: Fotografía tomada por los autores.

9.3.2. Futuros trabajos en materia de transporte de sedimentos en cursos

La continuidad y extensión del programa de monitoreo implementado entre la Facultad de Ingeniería y la DNH-MTOP, resulta fundamental a efectos de disponer de información de campo local que permita ajustar una herramienta para la estimación del transporte de sedimentos por fondo en cauces fluviales en Uruguay. Esto permitirá dotar a la autoridad nacional competente (DNH-MTOP) de una herramienta de apoyo a la toma de decisión (sometida a actualización y mejora continua), en base a la cual será posible establecer políticas de gestión de los cursos fluviales en cuanto al manejo de sedimentos. Ejemplo de ello puede ser suspender temporal o permanentemente permisos de extracción, limitar la extracción en determinados tramos y habilitar en otros, o evaluar el efecto de infraestructuras u obras fluviales existentes o proyectadas sobre el funcionamiento sedimentológico del río.

Figura 9-3. Pasarela sobre el río Santa Lucía. Ejemplo de punto de monitoreo de transporte por fondo utilizando el muestreador US-BL84



Fuente: fotografía tomada por los autores.

Por otra parte, y en paralelo a lo anterior, resulta necesario seguir avanzando en la comprensión de la interacción entre el flujo, el sedimento y las estructuras fluviales, aspectos que aún están abiertos desde el punto de vista científico y resultan de singular importancia práctica.

9.4. Referencias bibliográficas

Alonso, R.; Chreties, C.; López, G.; Teixeira, L. (2008): "Estimación del tiempo de recuperación del cauce del río San Salvador luego de una extracción de áridos". XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica (IAHR-LAD) - Cartagena, Colombia.

Arbeletche, P.; Ernst, O.; Hoffman, E. (2010). "Capítulo 1. La agricultura en el Uruguay y su evolución". En: García-Préchac *et al.* (Eds.) *Intensificación Agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural*. Colección Art. 2, CSIC-Univ. de la República, Uruguay: 13-27.

Chreties, C. (2012). "Informe Uruguay-Proyecto piloto para la resolución de conflictos en la cuenca del río Cuareim-Quaraí"- Informe Final-Programa Marco-Cuenca del Plata, GEF-OEA-CIC Plata.

Chreties, C.; Solari, S.; López, G.; Teixeira, L. (2014): "Analysis of the Solis Chico river mouth migration". Proceedings of 7th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow, Laussane, Suiza.

Chreties, C.; Teixeira, L. (2013): "Avances en la determinación de caudales dominantes en cursos fluviales no aforados de Uruguay". VI Simposio Regional sobre hidráulica de ríos- IAHR LAD. Santa Fe, Argentina.

Ernst, O.; Siri-Prieto, G. (2009). "Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators". *Soil and Tillage Research*, 105, 260-268.

FAO-ITPS (2015). *Status of the soils world's resources (SWSR)-Main Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.

FAO (2017). *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management*. Roma, Italy.

- García-Préchac, F.; Durán, A. (1998). "Propuesta de estimación del impacto de la erosión sobre la productividad del suelo en Uruguay". *Agrociencia*. 2(1), 26-36, Uruguay.
- García-Préchac, F.; Ernst O.; Siri G.; Terra, J. A. (2004). "Integrating no till in crop-pasture rotation in Uruguay. Review". *Soil and Tillage Research*. 77 (1): 1-13.
- García-Préchac, F.; Terra, J.; Sawchik, J.; Pérez Bidegain, M. (2017). Mejora de las estimaciones con USLE/RUSLE empleando resultados de parcelas de escurrimiento para considerar el efecto del agua del suelo. *Agrociencia*. 21(2):100-104, Uruguay.
- García-Préchac, F.; Salvo, L.; Ernst, O.; Siri-Prieto, G.; Quincke, J. A.; Terra, J. A. (2018). "Long-term effects of different agricultural soil use and management systems on soil degradation in Uruguay". En T. L. Napier *et al.* (Eds.) *Degradation of Soil and Water Resources: A Global Issue*, Book of the World Ass. of Soil and Water Conservation (en prensa).
- Jorge, G.; Pérez Bidegain, M.; Terra, J.; Sawchik, J. (2015). "Ajuste del modelo de erosión WEPP para un Argisol Subéutrico y un Brunosol Éutrico en el Uruguay". *Agrociencia*. 19(1):84-93, Uruguay.
- Pérez Bidegain, M.; García Préchac, F.; Hill, M.; Cléricali, C. (2010). "Capítulo 3. La erosión de los suelos en sistemas agrícolas". En: García-Préchac *et al.* (eds.). *Intensificación Agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural*. Colección Art. 2. Fondo Universitario para contribuir a la comprensión pública de temas de interés general. UdelaR-CSIC, Uruguay.
- Pérez Bidegain, M.; Piaggio, J. M.; Baetghen, W.; García-Préchac, F. (2017). "Actualización del factor erosividad de la lluvia en Uruguay". *Agrociencia* 21(2):91-99, Uruguay.
- Pérez Bidegain, M.; Hill, M.; Cléricali, C.; Terra, J. A.; Sawchik, J.; García-Préchac, F. "Chapter 7. Regulatory utilization of USLE/RUSLE erosion rate estimates in Uruguay: a policy coincident with the UN Sustainable Development Goals". En: R., Lal, R. Horn and T. Kosaki (Eds.) *Soil and Sustainable Development Goals of the U.N.* Science Publishers, Stuttgart, Germany (en prensa).
- Sganga J. C.; Victora, C. D.; Cayssials, R. (2005). Plan de acción nacional de lucha contra la desertificación y la sequía. Proy. GM2/020/CCD. DINARA-MVOTMA RENARE-MGAP, Montevideo-ROU.
- Teixeira, L.; Alonso, R.; Chreties, C.; López, G. (2008). "A methodology for sustainable sand mining from alluvial rivers". 4th International Conference on Fluvial Hydraulics- IAHR-2008 (River Flow-2008) - Turquía.
- Vilaseca, F.; Chreties, C. (2016). "Estudio Sedimentológico del Río Cuareim", XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR LAD, Lima, Perú.
- Vilaseca, F.; Chreties, C.; Teixeira, L. (2018). "Avances para la estimación de transporte de sedimentos por fondo en cauces de Uruguay". XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR LAD, Buenos Aires, Argentina.
- Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. (1978). "Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning". *Agriculture Handbook* Number 537. Washington: USDA.

Conclusiones

sin considerar el notable ejemplo de Estados Unidos con su Clean Water Act, no existen sistemas.

Entre las conclusiones más importantes, se debe destacar que la gestión de los sedimentos en los países de la región involucrados es tremendamente ineficiente y está generando problemas económicos, ambientales y sociales. Gran parte de los países manifiesta preocupación debido a la inmensa cantidad de territorios afectados por la erosión y la desertificación, lo cual perjudica no solo la productividad de la tierra, sino a la calidad de las aguas e, incluso, la del aire en zonas urbanas (polvos fugitivos). De igual forma, la mayoría de los países informa tener problemas serios con la sedimentación de embalses, lo cual pone en riesgo las reservas nacionales de agua para distintos usos. Por último, sin considerar el notable ejemplo de Estados Unidos con su Clean Water Act, no existen sistemas que regulen eficientemente la emisión de sedimentos, siendo una excepción Uruguay, un país que se vio obligado a crear un sistema regulador relativamente eficiente (aunque solo aplica a la agricultura), tras el hecho de que la erosión hídrica es considerada uno de sus principales problemas ambientales. Otro caso relevante es Brasil, un país que pierde USD 14.000 millones anuales como consecuencia de la erosión de suelos, creando así programas para proteger suelos privados aguas arriba. En el mismo sentido, Perú se planteó detener y revertir la erosión y desertificación en su territorio para el año 2030, un desafío que merece reconocimiento y representa un ejemplo a seguir para el caso de Argentina, Chile, Cuba y México, países que poseen gran parte de sus territorios bajo algún estado de degradación.

Por tanto, puesto que los sedimentos son considerados el principal contaminante de cuerpos de agua en la región LAC, se recomienda seguir el ejemplo estadounidense y crear en forma **urgente** normas que protejan tanto los suelos, como el agua y el aire, mediante sistemas legales que controlen **efectivamente** la emisión de sedimentos y den paso a la recuperación de suelos degradados en un lapso que no supere la década.

Adicionalmente, esta publicación permite obtener conclusiones muy relevantes para la región, en el marco de la gestión de sedimentos. En función de lo expresado por los diversos países, se concluye lo siguiente:

- a) La Iniciativa Internacional de Sedimentos para América Latina y el Caribe (ISI-LAC) del Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO ha venido desarrollando una serie de tareas destinadas a conseguir una mejor transferencia de los conocimientos relativos a los orígenes y consecuencias de los procesos erosión-sedimentación, definiendo con ello una ampliación de posibilidades de actuación de los países miembros de la red ISI. Sin embargo, a todas luces esto no es suficiente y el accionar de esta iniciativa es una más entre varias acciones nacionales e internacionales que es necesario coordinar y enmarcar en escenarios sinérgicos de colaboración, con un mayor espectro de acción e influencia territorial y temporal.
- b) El cambio climático es un elemento que está incidiendo decisivamente en una modificación de los valores probabilísticos de las variables hidrológicas y climáticas, y ello está determinando una situación de mayor incertidumbre en lo que respecta a los fenómenos conocidos relativos a erosión-sedimentación, lo que complejiza el problema y lo hace de aún más difícil resolución.
- c) Es muy necesario impulsar, apoyar y realizar investigaciones sobre la problemática de la erosión-sedimentación, dado que los problemas en diversas partes de los territorios de la región LAC, aunque parecen ser los mismos, se demuestra en este libro que responden a características particulares de los ecosistemas en que toman lugar. Esto determina que una buena gestión en estas materias requiere poseer un conocimiento de detalle sobre lo que ocurre, lo cual cobra mayor relevancia al considerar los efectos del cambio climático.

- d) La gestión de cuencas hidrográficas es un imperativo básico para abordar esta problemática. Los fenómenos en análisis se generan e impactan en estas unidades geográficas y, por tanto, una gestión de cuencas coadyuva al objetivo de reducir los riesgos de los procesos de erosión-sedimentación, cada vez que las poblaciones humanas realizan diversas actividades en estas zonas. De ahí la relevancia de considerar aspectos de ordenamiento territorial basados en la cuenca como unidad hidrográfica y de gestión.
- e) La interpretación del sistema y de los procesos de erosión-sedimentación es y ha sido compleja, debido a las características particulares que cada ecosistema imprime a los elementos resultantes, como se desprende de las expresiones de los diversos países que contempla este libro. Por ello, es necesario considerar y conocer los aspectos locales, para que las soluciones propuestas respondan a las particularidades de cada sistema conocido y ello lleva a que el enfrentar estos problemas requiera de aspectos interdisciplinarios, interinstitucionales y de planificación territorial.
- f) Los planes de actuación forestal poseen una importancia decisiva en el objetivo de frenar los procesos erosivos antrópicos y los impactos de los sedimentos aguas abajo. Asimismo, los planes hidrológicos de gestión del agua en las cuencas son vitales en el mismo objetivo. Sin embargo, se verifica en muchos países de la región LAC que ambas dimensiones de la gestión territorial no poseen conexión entre sí, lo que limita las capacidades de cada actuación y no permite contar con la sinergia que produce una adecuada imbricación de disciplinas, actores e instituciones, las que deberían estar muy ligadas en su actuar técnico, dados los objetivos a conseguir.

Los costos asociados a estos fenómenos no se conocen en su real dimensión y es altamente necesario cuantificarlos para poder conocer de qué magnitudes son los impactos relacionados. Esto permitiría dimensionar el efecto de las catástrofes sobre los presupuestos nacionales, los precios sombra incorporados y los costos de oportunidad que se desprenden, toda vez que a partir de estos elementos se podrán tomar decisiones avaladas por criterios técnicos, económicos y sociales.

- g) La información que se utiliza para la toma de decisiones, es decir datos duros de terreno, es vital para establecer cualquier tipo de gestión en estas materias. Por ende, es importante mantener, incrementar y automatizar las redes de toma de datos, ya que sin información confiable es imposible inferir las causas, origen e impacto del problema, y mucho menos establecer las posibles soluciones con una mínima base probabilística de éxito y de rentabilidad social y económica de las inversiones realizadas.
- h) La solución a estos problemas, aunque sea parcial, debe ser tratada en el marco del establecimiento de políticas públicas que den cuenta de la realidad local y que posean continuidad espacial y temporal, en un desarrollo sinérgico con otras problemáticas ligadas a las inundaciones, los movimientos en masa, el aislamiento de poblaciones humanas, el enfrentamiento de los riesgos de desastres naturales y la desertificación del territorio, entre otros aspectos. Solo de esta forma se podrá alcanzar un nivel creciente de seguridad de los habitantes de ciudades y zonas rurales y mitigar los impactos económicos, sociales y ambientales que generan estos desastres.
- i) Finalmente, se solicita a UNESCO seguir apoyando estas iniciativas, con el fin de propender a un intercambio de información entre actores relevantes de los países de la región, en donde los actores políticos posean un rol determinante en estas materias, apoyados por la experticia científica y técnica de profesionales e investigadores. Esto, porque son ellos los responsables últimos de asegurar productividad a los ecosistemas, seguridad a la población urbana y rural, sustentabilidad temporal y espacial de las acciones realizadas y mitigación frente a los impactos indeseables de los desastres naturales, y por tanto es un imperativo aportarles información de calidad para la correcta toma de decisiones en el contexto de la propuesta y puesta en marcha de políticas públicas de largo alcance.



