

# Modelamiento Hidrológico de la Descarga de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano

Síntesis del Análisis - 1ero de Diciembre de 2006

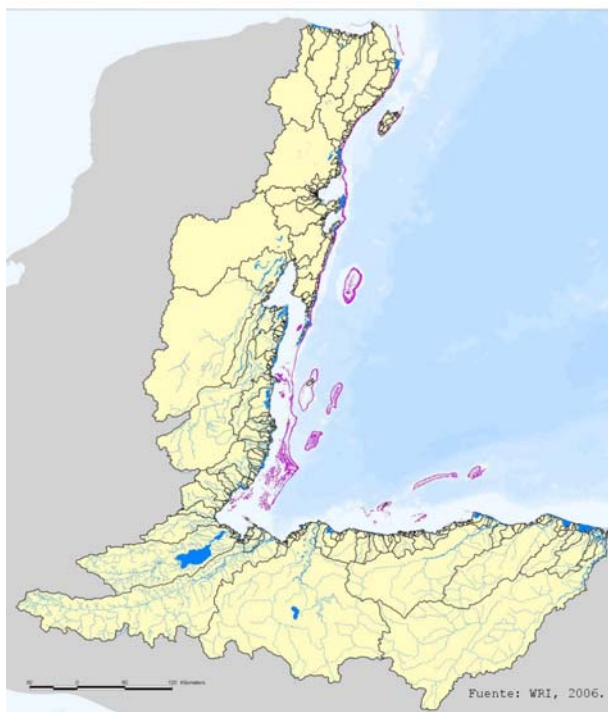
Por: Laretta Burke and Zachary Sugg

Con contribuciones de:

Will Heyman and Shin Kobara (Universidad de Texas A& M University)  
Laurent Cherubin, Christopher Kuchinke, Claire Paris, and Johnathan Kool (Universidad de Miami)

Traducción al Español de Carolina de Rosas y Ruth Noguero, WRI

**Cuencas hidrológicas de la región coralina Mesoamericana**



Con apoyo  
de:



Parte de la  
Alianza  
ICRAN MAR:



Colaboradores:



El proyecto Alianza para el Arrecife Mesoamericano de ICRAN (ICRAN-MAR) es apoyado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Fundación de las Naciones Unidas (UNF). El proyecto es ejecutado en conjunción con el Programa Ambiental del Caribe del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PAC-PNUMA).

La elaboración del componente de cuencas hidrológicas fue una colaboración entre el Instituto de Recursos Mundiales (WRI), el Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación del PNUMA (UNEP – *World Conservation Monitoring Centre -WCMC*) y el Fondo Mundial para la Naturaleza (*World Wildlife Fund -WWF*).

# Contenido

Figuras.....	1
Tablas.....	2
Siglas.....	3
Agradecimientos.....	4
Antecedentes del Proyecto.....	7
Hallazgos Clave.....	8
Panorama de la Metodología.....	11
Delineación de las Cuencas Hidrológicas.....	11
Base de datos de Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	14
Modelos de Descarga de Sedimentos y Erosión.....	16
Erosividad Pluvial y Precipitación.....	19
Vulnerabilidad del Terreno a la Erosión.....	20
Modelos de Escorrentía y Descarga de Contaminantes.....	20
Modelo de Circulación.....	22
Calibración y Validación del Modelo.....	23
Limitaciones del Análisis.....	27
Resultados del Análisis.....	28
1) Descarga de Sedimentos y Contaminantes en Base a la Cobertura Terrestre Actual (2003/04).....	28
2) Comparación de Resultados entre la Cobertura Terrestre Actual (2003/04) y la Cobertura Terrestre Hipotética Natural.....	29
3) Comparación entre la Cobertura Terrestre Actual y los tres Escenarios de Desarrollo para el Año 2025.....	31
4) Eventos Extremos.....	33
5) Transporte de Materia Suspensa en el Arrecife Mesoamericano.....	34
6) Vulnerabilidad Terrestre a la Erosión.....	38
7) Fuentes Locales de Sedimento y Nutrientes.....	39
Conclusión.....	40
Notas Técnicas Adicionales.....	43

## Figuras

Figura 1. Cuencas Hidrológicas de la Región del Arrecife Mesoamericano.....	12
Figura 2. Factor de Erosividad del Suelo (Factor-K).....	18
Figura 5. Relación Temporal entre los Valores Estimados de Descarga de Ríos Usando N-SPECT y el Coeficiente de Absorción de Materia Detrital de Color (CDM), derivado de Imágenes de Satélite del Norte de Honduras.....	26
Figura 6. Descarga de Sedimentos y Nitrógeno por Cuenca Hidrológica (Cobertura Terrestre Actual).....	29
Figura 7. Descarga de Sedimento Modelada a Partir de Cobertura Terrestre Actual y Natural.....	31
Figura 8. Distribución de Cobertura Terrestre dentro de Cada Escenario.....	32
Figura 9. Extensión de la Pluma de CDM para el 14 de Noviembre de 2000.....	34

Figura 10. Valores Estimados de Descarga Mensual Derivados de N-SPECT .....	35
Figura 11. Simulación de la Concentración de Materia Suspendida a lo Largo de la Región del Arrecife Mesoamericano para el Mes de Diciembre (Escenarios de Cobertura Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero).....	36
Figura 12. Concentración Máxima Simulada a lo Largo de la Región del Arrecife Mesoamericano Durante un Año (Escenarios de Cubierta Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero).....	37
Figura 13. Mapa de la Concentración de Materia Suspendida en el Arrecife Mesoamericano (Escenarios de Cobertura Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero) .....	37
Figura 14. Vulnerabilidad del Terreno a la Erosión .....	38
Figura 15 Contribución Promedio de Sedimento, Nitrógeno y Fósforo a Nivel de Sub- Cuencas.....	39

## **Tablas**

Tabla 1. Coeficientes del Factor-C en N-SPECT .....	18
Tabla 2. Coeficiente de Curvas de Descarga Usados en el Modelo N-SPECT por Tipo de Cobertura Terrestre y Grupo de Suelo Hidrológico.....	21
Tabla 3. Coeficientes de Contaminantes: Fósforo, Nitrógeno, y Total de Sólidos Suspendidos (TSS).....	21
Tabla 4. Comparación de Cobertura Terrestre Natural y Actual (Porcentaje en Cada Tipo de Cobertura) .....	30
Tabla 5. Comparación de los Resultados Regionales Usando Modelos Anuales en Cobertura Terrestre Actual y Cobertura Terrestre Natural .....	30
Tabla 6. Comparación entre Escenarios de Cobertura Terrestre (Porcentaje de Cada Tipo de Cobertura) .....	32
Tabla 7. Comparación de Resultados Regionales entre los Modelos Anuales de Cobertura Terrestre Actual y los Tres Escenarios para 2025 .....	33
Tabla 8. Porcentaje de las Fuentes de Erosión, Nitrógeno y Fósforo por País dentro de la Región del Arrecife Mesoamericano .....	40

## Siglas

CDM	Materia Detrital de Color ( <i>Colored Detrital Matter</i> )
DEM	Modelo de Elevación Digital ( <i>Digital Elevation Model</i> )
GEO	Panorama Ambiental Global ( <i>Global Environmental Outlook</i> )
ICRAN	Red Internacional de Acción para los Arrecifes de Coral ( <i>International Coral Reef Action Network</i> )
ICRAN-MAR	Proyecto del ICRAN en el Arrecife Mesoamericano ( <i>Mesoamerican Reef</i> )
N-SPECT	Herramienta para la Comparación de la Descarga de Contaminantes y Erosión ( <i>Nonpoint-Source Pollution and Comparison Tool</i> )
PAC-PNUMA	Programa Ambiental del Caribe del PNUMA
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
ROMS	Systema para el Modelaje Oceánico Regional ( <i>Regional Ocean Modeling System</i> )
RUSLE	Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo ( <i>Revised Universal Soil Loss Equation</i> )
SeaWiFS	Sensor de Observación Amplia del Mar ( <i>Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor</i> )
SOA	Algoritmo de Optimización Espectral ( <i>Spectral Optimization Algorithm</i> )
SOTERLAC	Base de Datos de Suelo y Terreno para América Latina y el Caribe ( <i>Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean</i> )
TSS	Total de Sólidos Suspendidos ( <i>Total Suspended Solids</i> )
USAID	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional ( <i>United States Agency for International Development</i> )
WCMC	Centro Mundial de Vigilancia y Conservación del PNUMA ( <i>World Conservation Monitoring Centre</i> )
WRI	Instituto de Recursos Mundiales ( <i>World Resources Institute</i> )
WWF	Fondo Mundial para la Naturaleza ( <i>World Wildlife Fund</i> )

## Agradecimientos

La realización de este CD de datos fue posible gracias a las generosas contribuciones de la Fundación de las Naciones Unidas (*United Nations Foundation*), y la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) dentro de la Alianza para el Arrecife Mesoamericano (*Mesoamerican Reef – MAR*) de la Red Internacional de Acción para los Arrecifes de Coral (*International Coral Reef Action Network -ICRAN*). El Instituto de Recursos Mundiales agradece y reconoce a las múltiples organizaciones que colaboraron y los colegas que contribuyeron a este proyecto y a la producción de este CD, incluyendo ICRAN, UNEP-World Conservation Monitoring Center (WCMC), y el Fondo Mundial de la Naturaleza (WWF). Agradecemos a Emil Cherrington (*Belize Coastal Zone Management Institute*) y Centro del Agua del Trópico Húmedo de América Latina y el Caribe - CATHALAC) por el desarrollo de los datos y su guía en asuntos de datos espaciales; agradecemos también a Joep Luijten (consultor para UNEP-WCMC) y Lera Miles (UNEP-WCMC) por los modelos usados para crear escenarios del uso de suelo; gracias a Eric van Praag (consultor para UNEP-WCMC) por facilitar los talleres de instrucción y política para este proyecto, Liza Agudelo y Armeid Thompson (proyecto ICRAN MAR) y Kristian Teleki y Nic Barnard (ICRAN) por su apoyo y aliento a lo largo del proyecto. Gracias a Will Heyman y Shin Kobara (Universidad A&M de Texas) por su asistencia en la calibración del modelo hidrológico, y a Jamie Carter y Dave Eslinger (*US National Oceanographic and Atmospheric Administration*) por su guía en la implementación del modelo N-SPECT. Agradecemos también a Claire Paris, Laurent Cherubin, Christopher Kuchinke, y Johnathan Kool (Universidad de Miami) por adaptar un modelo de circulación con el propósito de examinar la dispersión de sedimentos a lo largo del Arrecife Mesoamericano. Agradecemos también a Néstor Windevoxhel y Alejandro Arrivillaga (*The Nature Conservancy*) por su apoyo conjunto en la implementación del modelo de circulación. Gracias a Ramón Frutos (Servicio Meteorológico de Belice) por la información sobre huracanes, y Jan Merman (Estudios Tropicales de Belice) por información sobre cobertura de terreno y cuencas hidrológicas. Gracias al proyecto Sistema del Arrecife de Barrera Mesoamericano (*Mesoamerican Barrier Reef System* (MBRS) del Banco Mundial/GEF que ayudó a identificar el modelo N-SPECT como una herramienta valiosa para este estudio. Gracias a Melanie McField (WWF e Institución Smithsonian) por sus constructivos comentarios, y su guía analizando los impactos del proyecto MAR; gracias a José Vásquez, Silvia Marín, Shalini Cawich y Gina De Ferrari (WWF) por su valiosa asistencia bajo la asociación ICRAN. Gracias a Serge Andrefouet por la valiosa información sobre arrecifes de coral para el proyecto MAR. Gracias a Suzie Greenhalgh, Daniel Prager, Janet Ranganathan, Isabel Munilla, y David Jhirard (WRI) por sus valiosas revisiones y comentarios; gracias a Jenny Guiling (WRI) por la información para calibrar los resultados del modelaje. Gracias a Ron Valenzuela (WRI) por la edición de este documento, y particularmente gracias a Carolina de Rosas y Ruth Noguérón por la traducción al español de este documento.

*Este CD fue hecho posible gracias al apoyo de la oficina del Programa Guatemala-Centroamérica, de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), bajo los términos del contrato número 596-G-00-03-00163-00. Las opiniones expresadas en este documento pertenecen solamente a los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) o UNEP.*

# Modelamiento Hidrológico de la Descarga de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano

## Resumen del Proyecto

Este documento describe la metodología y los resultados de un análisis hidrológico implementado por el Instituto de Recursos Mundiales (WRI) como parte de la colaboración de la Alianza para el Arrecife Mesoamericano (*Mesoamerican Reef – MAR*) de la Red Internacional de Acción para los Arrecifes de Coral (ICRAN). El objetivo del análisis fue de cuantificar, basándose en amenazas terrestres, el impacto de las alteraciones humanas al paisaje en el Arrecife Mesoamericano para informar la planificación de uso de suelo, políticas y prácticas agrícolas, identificación de prioridades para la conservación, y esfuerzos para mitigar riesgos.

Durante dos años, WRI trabajó con muchos colaboradores en la región para evaluar la descarga de sedimentos y nutrientes terrestres en más de 400 cuencas hidrológicas que drenan en la región adyacente al Arrecife Mesoamericano. El análisis evalúa la cantidad de sedimento y nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) proveniente de cada lote del terreno; la cantidad de sedimento erosionado y nutrientes que llegan a la boca de los ríos (punto de descarga costera); y la cantidad de sedimento que llega a los arrecifes coralinos. Además, el análisis proporciona estimaciones sobre el incremento de sedimento y nutrientes que resultan de las actividades humanas, y predice el transporte futuro de sedimentos y nutrientes (en 2025) basándose en diferentes escenarios de uso de suelo. Este es el primer análisis de este tipo y nivel de detalle para la región del Arrecife Mesoamericano.

Los resultados proporcionan una perspectiva preliminar de los patrones de transporte y descarga de sedimento y nutrientes a nivel regional, e indican cómo las alteraciones humanas en el paisaje terrestre pueden influir estos patrones. Para asegurarse de que los resultados de este proyecto y los métodos de análisis apoyan acciones concretas en la región, WRI pone a disposición del público en general la información, el método analítico y las herramientas de modelaje; con el mismo objetivo, WRI ha conducido talleres de capacitación de usuarios en la región. A partir de ésta capacitación, los usuarios regionales pueden implementar análisis más detallados y enfocados a áreas más pequeñas calibrando los modelos a las condiciones locales.

Toda la información utilizada en este análisis, todos los resultados del modelo así como los metadatos se encuentran en el CD *Análisis de Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano*, WRI/ICRAN Proyecto MAR, 2006. Este documento comienza con una descripción de la colaboración WRI-ICRAN, un resumen de los hallazgos clave del análisis así como una descripción de los métodos analíticos y un resumen de los resultados del análisis.

## Antecedentes del Proyecto

Compartido por México, Belice, Honduras y Guatemala, el Arrecife Mesoamericano se extiende sobre 1,000 km y es el arrecife continuo más grande del Hemisfero Occidental. La alteración de los paisajes terrestres para el desarrollo, construcción de caminos, o agricultura puede tener impactos adversos en los arrecifes coralinos a través del incremento de transporte de sedimentos, nutrientes y otros contaminantes a las aguas costeras. Las amenazas del clareo de terrenos son más altas en áreas donde el relieve es más vertical, la precipitación pluvial es intensa y los suelos erosivos.

El uso apropiado de suelo es esencial para el manejo de las cuencas hidrológicas para poder minimizar el transporte de sedimentos, nutrientes, y otros contaminantes a los arrecifes coralinos. En la región mesoamericana, más de 300,000 hectáreas de terreno son destinadas a la producción de bananas, aceite de palmera, caña de azúcar, cítricos, y ananá. Tanto sedimentos ya erosionados, como residuos de fertilizantes y pesticidas utilizados en este tipo de industrias, se filtran a través de ríos y corrientes y entran a las aguas costeras del Arrecife Mesoamericano.

Como parte del proyecto de la Alianza para el Arrecife Mesoamericano (MAR) de la Red Internacional de Acción para los Arrecifes de Coral (ICRAN), el **Instituto de Recursos Mundiales (WRI)** colaboró con el **Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación del PNUMA (UNEP-World Conservation Monitoring Center - WCMC)** y el **Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF)** para conducir un análisis comprensivo de cuencas hidrológicas; este análisis complementa otras actividades del proyecto MAR sobre pesquerías sostenibles y turismo sostenible.

El análisis de las cuencas hidrológicas realizado por el proyecto ICRAN MAR fue desarrollado para producir información y herramientas que buscan examinar los impactos posibles que los diferentes usos de suelo y distintas opciones en desarrollo podrían tener en la región, como así también los impactos asociados con la calidad del agua en la región del Arrecife Mesoamericano. El proyecto tiene los siguientes objetivos:

- Relacionar diferentes modelos de uso de suelo dentro de las cuencas hidrológicas con los impactos en los arrecifes coralinos, e identificar los arrecifes que corren alto riesgo de degradación;
- Identificar las cuencas hidrológicas más vulnerables a la erosión y aquellas que aportan la mayor cantidad de sedimentos y contaminantes a las aguas costeras;
- Adaptar herramientas para poder pronosticar tendencias importantes, poder evaluar diferentes opciones en decisiones políticas o de desarrollo, y poder facilitar mejoras en el manejo de las tierras a través de la región;
- Apoyar nuevas relaciones y alianzas estratégicas con grupos claves como gobiernos locales, compañías agro-industriales de gran nivel, así como comunidades agrícolas independientes;
- Utilizar los resultados de los modelos y herramientas de diagnóstico para asistir en la educación y promover el uso, por parte de ciertos grupos de interés, de “mejores prácticas de manejo” para reducir los impactos en las costas y los recursos marítimos.



El proyecto de cuencas hidrológicas ICRAN-MAR incluye componentes analíticos que investigan los cambios en la cobertura terrestre y los impactos relacionados con la descarga de los ríos, la erosión, la descarga de sedimentos y contaminantes, y el transporte dentro de las aguas costeras. El proyecto también incluye actividades directas con negocios agrícolas para implementar mejores prácticas de manejo. Durante la ejecución del proyecto se consultaron muchos colaboradores locales en relación con el manejo de la información, la información de entrada del modelo y la evaluación, y en las prácticas de manejo agrícolas. Tres socios de ICRAN colaboraron en este esfuerzo:

- UNEP-WCMC – desarrolló los escenarios de la cobertura terrestre y proporcionó bases de datos cuya información fue sumada a los modelos hidrológicos;
- WRI – implementó la delineación de las cuencas hidrológicas y el análisis hidrológico para la región del Arrecife Mesoamericano; WRI también realizó el análisis de la vulnerabilidad a la erosión, y coordinó el modelo de circulación a lo largo del Arrecife Mesoamericano;
- WWF – lideró el esfuerzo de diálogo con negocios agrícolas para implementar mejores prácticas de manejo.

El trabajo de WWF con negocios agrícolas se enfoca en la reducción de pesticidas de prioridad en el ambiente marino del Arrecife Mesoamericano y en el control de la erosión del suelo desde el punto de vista del sector comercial agrícola. WWF está trabajando en conjunto con socios en el cultivo de la banana, el ananá, cítricos, y el azúcar. El análisis realizado bajo este proyecto ayuda a WWF y a otras organizaciones a establecer prioridades para poder alcanzar mejores prácticas de manejo de las tierras, así como para guiar la planificación del uso de las tierras.

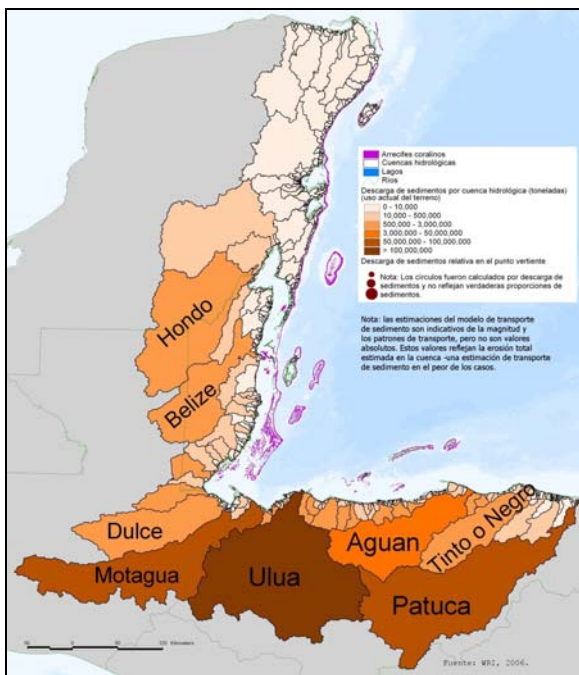
## **Hallazgos Clave**

Este análisis hidrológico ayuda a integrar una gran variedad de información, y adapta herramientas de modelaje para hacer un análisis innovativo y regional del Arrecife Mesoamericano. Los resultados regionales presentados en este documento deben ser considerados como preliminares y como un indicador general de los patrones y la magnitud de la erosión y descarga de sedimentos y nutrientes a través de la región. Un aspecto importante de este proyecto es el proporcionar las herramientas de modelaje a diferentes colaboradores en la región, de manera que ellos puedan aplicar el análisis con mayor resolución y proporcionen resultados más detallados para regiones más pequeñas dentro de la región del Arrecife Mesoamericano. Esto permitirá también el refinamiento y una mejor calibración del modelo para las condiciones locales dentro de la región del Arrecife Mesoamericano.

## Sobre el origen de los sedimentos y los nutrientes que llegan al Arrecife Mesoamericano:

- La mayoría del sedimento y nutrientes transportados por las cuencas hidrológicas que desembocan en el Arrecife Mesoamericano se originan en Honduras. Se estima que más del 80 por ciento del sedimento, y más de la mitad de los nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) se originan en Honduras.
- Guatemala fue identificada como la fuente de cerca de un sexto (1/6) de todos los sedimentos y casi un cuarto (1/4) de todo el Nitrógeno y Fósforo que entra a las aguas costeras a lo largo del Arrecife Mesoamericano.
- El modelo indica que, comparado con otros países, un porcentaje relativamente menor de sedimento a nivel regional proviene de Belice y México. Belice contribuye con entre 10-15 por ciento de los nutrientes, y se estima que México contribuye con un 5 por ciento de los nutrientes para todas las cuencas del modelo. Es probable que el porcentaje para México este sub-estimado puesto que la contribución de los ríos subterráneos no se consideró en el modelaje.
- De las 400 cuencas hidrológicas de la región del Arrecife Mesoamericano, la cuenca del Río Ulua en Honduras contribuye con la mayor cantidad de sedimentos, Nitrógeno y Fósforo. Otros ríos grandes que transportan sedimentos y nutrientes en cantidades significativas son el Río Patuca (en Honduras), el Río Belice (en Belice), y el Río Tinto ó Negro (en Honduras).

**Figura A. Transporte de Sedimento Anual de las Cuencas Hidrológicas del Arrecife Mesoamericano (Cobertura terrestre actual).**



**La escorrentía, erosión y transporte de nutrientes a las aguas costeras está incrementando:**

- Como resultado de las alteraciones humanas en el paisaje terrestre, la escorrentía, y las descargas asociadas en la desembocadura de los ríos casi se ha duplicado; la descarga de sedimentos en la desembocadura de los ríos ha incrementado por un factor de veinte; la descarga de Nitrógeno ha incrementado por un factor de tres, y la descarga de Fósforo por un factor de siete (las proporciones están basadas en los resultados del modelo usando información de uso de suelo actual (2003/2004) y cobertura terrestre natural hipotética (no alterada).

**Los posibles impactos de las diferentes opciones de desarrollo y de uso de suelo varían:**

- De acuerdo con el escenario de uso de suelo que favorece los mercados y políticas ambientales limitadas, la descarga de nutrientes muy probablemente incrementará un 10 por ciento en el 2025, mientras que la descarga de sedimento podría incrementar un 13 por ciento o más.
- Si se implementan políticas ambientales que favorecen el desarrollo sostenible, la descarga de nutrientes y sedimentos probablemente será reducida por al menos 5 por ciento de los niveles actuales, promoviendo la recuperación de corales degradados.
- La implementación de mejores prácticas de manejo agrícolas resultaría en reducciones en la descarga de sedimento y nutrientes más allá de aquellas evaluadas en este estudio puesto que este estudio se ha enfocado solamente en los efectos derivados de los cambios en la cubierta terrestre.

## Panorama de la Metodología

En colaboración con instituciones de la región del Arrecife Mesoamericano, WRI:

- Implementó la delineación de cuencas hidrológicas en todas las tierras que drenan en la región del Arrecife Mesoamericano;
- Implementó un análisis hidrológico para examinar las fuentes de sedimentos y nutrientes provenientes de toda ésta área de drenaje, así como también la descarga de sedimentos y nutrientes en aguas costeras;
- Aplicó esta herramienta de análisis hidrológico para examinar la descarga de sedimentos y nutrientes usando varios escenarios de cobertura terrestre (cobertura terrestre “actual”, cobertura terrestre original o “natural”, y tres escenarios de cobertura terrestre para el año 2025);
- Incorporó los resultados del análisis hidrológico en un modelo de circulación para examinar el transporte de sedimentos a través de la región del Arrecife Mesoamericano; y
- Trabajó con varios colaboradores en la calibración y validación de los resultados de los modelos.

### ***Delineación de las Cuencas Hidrológicas***

Las cuencas hidrológicas son una unidad esencial de este análisis, ya que constituyen el enlace entre un área terrestre con la corriente y la red fluvial, y el punto de descarga en el mar. Las cuencas hidrológicas fueron delineadas a partir de un modelo de elevación digital (*Digital Elevation Model* - DEM) corregido a una resolución de 250m. El DEM se basa en una resolución de 90m establecido por la Misión SRTM de NASA (*Shuttle Radar Topography* - SRTM), el cual fue promediado y proyectado a una resolución de 250m para poder construir los modelos hidrológicos y de cobertura terrestre utilizados en este proyecto. Ya que los datos de elevación provenientes de radares poseen inexactitudes, como por ejemplo, toman en cuenta la parte superior de los árboles y construcciones como parte de la elevación, fue necesario “corregir” esta información como parte del proceso de delineación de las cuencas hidrológicas. Varios ríos y lagos mapeados fueron superpuestos en el DEM, a través de un proceso que denominado “grabado” de DEM. Los ríos (como líneas) fueron proporcionados por la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD) y los polígonos de lagos y lagunas fueron proporcionados por WWF; estos fueron utilizados para desarrollar una base de datos para la corrección del DEM. La cuadrícula de celdas fue superpuesta (a 20m de elevación) dentro del DEM<sup>1</sup> para capturar la descarga del agua de acuerdo con la inclinación del terreno. Esta versión “grabada” de la base de datos, fue utilizada para la delineación de cuencas hidrológicas en el programa ArcMap desarrollado por el Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales (*Environmental Systems Research Institute* -

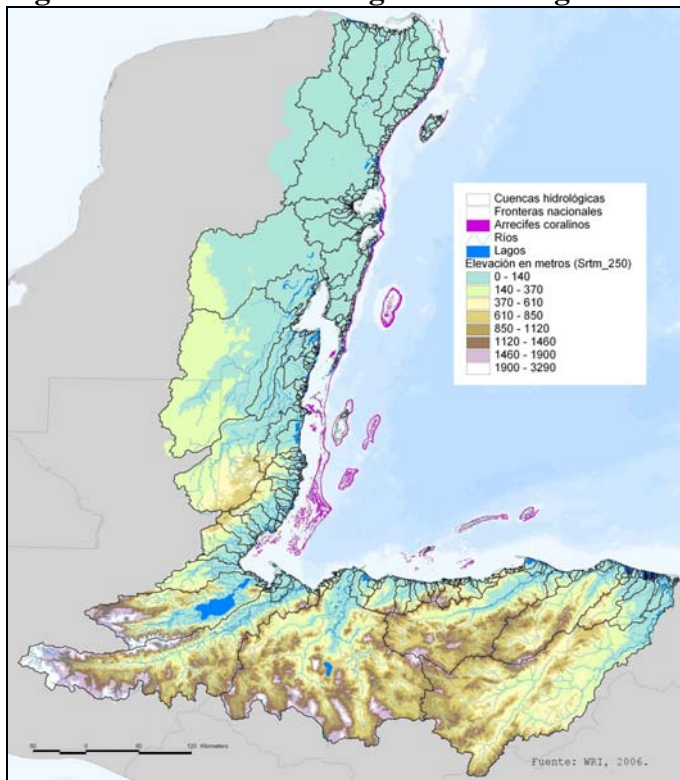
---

<sup>1</sup> Ver los metadatos en el CD *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef*, para fuentes de datos, así como también la información de SIG usados para la corrección.

ESRI). Por cada celda de la retícula—equivalente a 250m en el DEM—la dirección de la corriente y el número de celdas dentro de cada retícula (acumulación caudal) fueron identificadas; de la misma manera, se identificaron las celdas que corresponden a cada cuenca hidrológica (área que desagua en un punto particular de la costa). Una retícula de 250m con una acumulación caudal máxima en cada cuenca fue identificada como “punto de descarga”, en el Arrecife Mesoamericano. Las cuencas con un área menor a 5 km<sup>2</sup> fueron excluidas. Más de 430 cuencas hidrológicas, de por lo menos 5 km<sup>2</sup> de área fueron identificadas. (Un suplemento de notas técnicas acerca de la delineación de cuencas hidrológicas se encuentra al final de esta publicación).

Este producto final “delineaciones de cuencas hidrológicas en la región del Arrecife Mesoamericano” se benefició de varias rondas de revisiones y de información adicional proporcionada por varios proyectos ya existentes. La delineación de las cuencas hidrológicas fue revisada una vez más durante el taller de cuencas hidrológicas organizado por ICRAN MAR en Belice, en Agosto de 2006. Es importante notar que la delineación de las cuencas hidrológicas en la región MAR es confiable, pero la delineación en la región de Yucatán es inexacta dada la extensiva topografía cárstica con ríos subterráneos y la falta de aguas superficiales.

**Figura 1. Cuencas Hidrológicas de la Región del Arrecife Mesoamericano**



## **Modelo hidrológico**

Las amenazas provenientes de fuentes de sedimentos y nutrientes terrestres fueron evaluadas usando la herramienta *Nonpoint Source Pollution and Erosion Comparison Tool* (N-SPECT) desarrollada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (*US National Oceanographic and Atmospheric Administration - NOAA*). N-SPECT es un programa de dominio público que corre como una extensión opcional dentro del programa ArcMap de ESRI. Esta herramienta combina información del ambiente físico (elevación, inclinación, suelos, precipitación y cobertura terrestre) para derivar estimaciones de fuentes de descarga, erosión y contaminantes (Nitrógeno, Fósforo, y Total de Sólidos Suspendidos) a través del terreno, así como también estimaciones de acumulación y concentración de sedimentos y contaminantes en las corrientes y redes fluviales. N-SPECT fue implementado a una resolución de 250m para la región del Arrecife Mesoamericano. Esto quiere decir que el modelo N-SPECT evalúa cada celda de la retícula con resolución de 250m (6.25 hectáreas) en relación con su contribución a la escorrentía, sedimentos, y descarga de contaminantes dentro de la cuenca hidrológica. Los resultados del análisis de dicha herramienta tienen el objetivo de ser usados como herramientas de protección para asistir en el entendimiento de los impactos que tienen la toma de decisiones en la calidad del agua, y finalmente, en la salud de los arrecifes coralinos cercanos a las costas.

El modelo N-SPECT puede ser utilizado para evaluar descargas anuales o de acontecimientos específicos, erosión, y la descarga de sedimentos y contaminantes. N-SPECT puede ser modificada para evaluar estas descargas de manera mensual. La herramienta puede calcular la acumulación de descarga, sedimentos, o contaminantes en el terreno (esta es una función típica) o calcular “efectos locales”, es decir cuánto sedimento, contaminantes, o escorrentía provienen de cada celda de la retícula. Todas estas opciones fueron utilizadas en el análisis de amenazas terrestres a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano.

- a) **Descargas Anuales** – Para la región del Arrecife Mesoamericano, el modelo N-SPECT fue utilizado para evaluar escorrentía anual, descarga de sedimentos y nutrientes asociados con diferentes escenarios de cobertura terrestre – cobertura terrestre actual (años 2003/04), cobertura terrestre hipotética “natural”, y tres posibles escenarios de cobertura terrestre para el año 2025. Durante estos periodos “anuales”, el modelo N-SPECT fue utilizado usando la elevación, inclinación, y precipitaciones anuales como parámetros constantes. Solamente la información sobre el tipo de cobertura terrestre varió para evaluar la influencia de dicha variable sobre la descarga de sedimentos y nutrientes.
- b) **Descargas mensuales** – El modelo N-SPECT también fue utilizado usando información de precipitación anual para derivar estimaciones mensuales de escorrentía y las descargas de sedimentos en la desembocadura de los ríos; estos resultados constituyeron datos de entrada esenciales para el modelo de circulación de la región que se implementó mensualmente.
- c) **Efectos locales / fuentes de contaminación** – El modelo N-SPECT fue utilizado en el modo “efectos locales” usando información sobre la cobertura terrestre actual (año 2003/04) para evaluar la cantidad de sedimentos y nutrientes

- (Nitrógeno y Fósforo) que se originan desde cada celda de la retícula (cada celda representa 250m), independientemente de las contribuciones provenientes de celdas adyacentes y/o de río arriba.
- d) **Tormentas** – El modelo N-SPECT también fue utilizado para examinar escorrentía y descargas de sedimentos y nutrientes asociados a la ocurrencia de huracanes. Esta aplicación utiliza la característica particular de N-SPECT “efecto de tormenta”, que utiliza los mismos datos de elevación, inclinación, y suelo que las pruebas anteriores, así como también la misma cobertura terrestre actual (año 2003/04), e información sobre precipitación local para los diferentes días de tormentas.

### **Base de datos de Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Todas las bases de datos SIG utilizadas en el análisis hidrológico se encuentran en formato UTM, (*Universal Transverse Mercator* -UTM), con una proyección NAD1927 (Datum para Centroamérica). Toda la información de entrada y los resultados del modelo se encuentran disponibles en el CD de datos Análisis de las Cuencas Hidrológicas del Arrecife Mesoamericano (*Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef*) del proyecto de WRI / ICRAN MAR, 2006.

**La información de entrada** utilizada en el análisis hidrológico incluye:

- 1) **Elevación** – Modelo de elevación digital de 250m, derivado de datos con una resolución de 90m establecido por *NASA Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM)
- 2) **Suelos** – la información sobre suelos provino de la Base de Datos de Suelo y Terreno para América Latina y el Caribe (*Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean* -SOTERLAC), en formato de polígonos.
- 3) **Precipitación** – la información de precipitaciones mensual provino de una base de datos de 1km de resolución global llamada *WorldClim*<sup>2</sup>. Esta base de datos proporciona promedios de precipitación a largo plazo. Para el uso de N-SPECT, todos los datos acerca de precipitación fueron convertidos a pulgadas.
- 4) **Cobertura terrestre** – cinco escenarios representativos de cobertura terrestre fueron utilizados para poder evaluar el impacto que tienen los cambios en cobertura terrestre sobre la descarga de sedimentos y nutrientes en la desembocadura de los ríos a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano.
  - a. **Cobertura terrestre “Actual”** – Se utilizaron “Mapas de ecosistemas” nacionales de México, Guatemala, Honduras (2003) y Belice (2004) como base para el mapeo de la cobertura terrestre actual. Los datos de los cuatro países fueron unidos y convertidos a una resolución<sup>3</sup> de 250m.

---

<sup>2</sup> Ver 2005. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. (14 páginas) Descripción del desarrollo de la base de datos de WorldClim, clima global. En *International Journal of Climatology*. Robert J. Hijmans, et al. on *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* data CD, WRI / ICRAN MAR proyecto, 2006.

<sup>3</sup> Para algunas celdas “sin datos” sobre la cobertura terrestre a lo largo de la costa, se usó información sobre la cobertura terrestre de la celda más cercana. Además, en ciertas localidades, la clasificación de

- b. **Cobertura terrestre “natural”** – La cobertura “original” o natural de Belice, Guatemala, y Yucatán provinieron de una base de datos vectorial creada por Pronatura (*Original land cover*).<sup>4</sup>

**Cobertura terrestre en el año 2025.** Se desarrollaron tres mapas de cambio en la cobertura terrestre desde 2005 al 2025 para la región del Arrecife Mesoamericano, basándose en los procesos resultantes de tres escenarios: Mercados primero, Políticas primero, y Sustentabilidad primero. Esta información provino del Informe Ambiental Global de PNUMA (*Global Environment Outlook - GEO*).<sup>5</sup> Estos escenarios modelan las diferentes trayectorias sociales, políticas y económicas en la región, haciendo énfasis en los resultados para el medio ambiente y el bienestar humano.

- c. **Escenario de “Mercados primero” en la cobertura terrestre en el año 2025** – Este escenario de desarrollo comercial está basado en el informe *GEO Market First Scenario* para América Latina. En este escenario, la mayor parte del mundo adopta los valores y las expectativas que prevalecen en los países industriales de hoy. La riqueza de las naciones y las fuerzas del mercado dominan las prioridades políticas y sociales. Las políticas públicas están enfocadas en realizar esfuerzos para apoyar intereses comerciales y promover el intercambio de bienes y servicios. Las políticas sociales y del medio ambiente reciben poca atención o apoyo económico, ya que se asume que el crecimiento económico por sí mismo será suficiente para progresar. Este escenario muestra los porcentajes más altos de expansión agrícola. Los datos de cobertura terrestre de 250m que reflejan este escenario fueron desarrollados por UNEP-WCMC.
- d. **Escenario de “Políticas primero” en cobertura terrestre en el año 2025** – Este escenario está basado en el *GEO Policy First Scenario* para América Latina. En este escenario las decisiones gubernamentales acerca

---

celdas de agua se hizo en base a datos provenientes de Pronatura, especialmente en cuerpos de agua en diferentes localidades de Belice, Guatemala y Yucatán.

<sup>4</sup> Las clases del terreno fueron reclasificadas para que sean iguales a las clases utilizadas por el análisis hidrológico de ICRAN MAR, y también convertidas a una resolución de 250m. Para Honduras, el mapa de ecosistemas de Honduras (2003) fue modificado de la siguiente manera: la cobertura del terreno en áreas “cultivadas” y “desarrolladas” fueron reclasificadas en base al tipo de cobertura de terrenos adyacentes, con la excepción de agua (no permite expandirse) y pantanos (solo permitido a expandirse si es debajo de 20m de elevación).

<sup>5</sup> La cuantificación en el cambio de la cobertura del terreno fue desarrollada importando información de GEO 4 a partir de los modelos desarrollados por *International Futures* e IMAGE, y acompañados por una serie de narraciones adaptadas a partir de los aportes del grupo para América Latina y el Caribe. Los mapas con escenarios de áreas protegidas se desarrollaron tomando en cuenta las políticas internacionales relacionadas al cubrimiento de biomasa y especies en peligro; dichas políticas se modelaron de manera diferente y de acuerdo con los objetivos definidos para cada escenario. El modelo CLUE-S fue utilizado para distribuir el cambio de la cobertura del terreno. Más información sobre esta metodología se puede encontrar en Luijten, J., Miles, L., Cherrington, E. (2006) *Land use change modelling for three scenarios for the MAR region*. Reporte técnico para el proyecto ICRAN MAR. UNEP-WCMC.



de ciertas iniciativas tienen el propósito de alcanzar metas específicas en los ámbitos sociales y del medio ambiente. Los esfuerzos a favor del medio ambiente y contra la pobreza actúan como balanza ante el *momentum* generado por el desarrollo económico a cualquier costo. Las ganancias y costos en el ámbito social y del medio ambiente se miden en regulaciones políticas, marcos regulatorios, y procesos de planificación. Estos son reforzados por incentivos fiscales como impuestos sobre carbono. El uso de la tierra comienza a ser regulada con más atención, especialmente alrededor de los corredores ribereños. Los datos de 250m de resolución asociados con la cobertura terrestre fueron desarrollados por UNEP-WCMC.

- e. **Escenario de “Sustentabilidad primero” en cobertura terrestre en el año 2025** – Este escenario está basado en el *GEO Policy First Scenario* para América Latina; una nueva paradoja del medio ambiente y el desarrollo emergen en respuesta al desafío de sustentabilidad, apoyado por nuevos valores e instituciones que son más equitativas. En este escenario prevalece un estado con visión futurista, donde ocurren cambios radicales, y en donde la manera en que la gente se relaciona entre sí y con el ambiente que los rodea estimula y apoya medidas y políticas sustentables y un comportamiento empresarial más responsable. El uso más eficiente de la energía, la tierra, y recursos materiales se destaca en este escenario. Hay esfuerzos para adoptar un camino ecológico a la planificación del uso de la tierra, con atención especial a la protección de las cuencas hidrológicas. Los datos de 250m de resolución asociados con la cobertura terrestre fueron desarrollados por UNEP-WCMC

### ***Modelos de Descarga de Sedimentos y Erosión***

El modelo N-SPECT evalúa la erosión anual de cada celda de la retícula basándose en la ecuación universal revisada de pérdida de suelos (*Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE*) desarrollada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*US Department of Agriculture*)<sup>6</sup>. RUSLE combina la inclinación, precipitaciones, suelo, y cobertura terrestre para estimar las pérdidas del suelo anuales para esa localidad.

---

<sup>6</sup> USDA Manual de Agricultura No. 703, que se encuentra en el CD de datos *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef*, WRI / ICRAN MAR proyecto, 2006.

## Ecuación 1: RUSLE

$$\text{Promedio anual de pérdida de suelos (toneladas/acres)} = R * K * L * S * C * P$$

*R* – Factor de erosividad de la descarga pluvial

*K* – Factor de erosividad del suelo

*L\*S* – Factor de inclinación de la pendiente y de medida

*C* – Factor de administración de cobertura

*P* – Factor de apoyo a prácticas

Las bases de datos introducidas anteriormente son elevación, suelo, precipitación, y cobertura terrestre. El modelo N-SPECT utiliza estos datos como base para derivar los factores que se utilizan en la ecuación RUSLE. Algunos de estos derivados son complicados y están descritos a continuación; las notas técnicas en la parte final de este informe incluyen información adicional. En síntesis:

- **Factor-LS** – Este factor ajusta las tasas de erosión en base a la topografía, asignando tasas más altas ó más largas a las pendientes más inclinadas y tasas menores o más cortas a las pendientes menos inclinadas.<sup>7</sup> Inclinación de la pendiente (S) y largo de la pendiente (L) derivadas del DEM y N-SPECT. La combinación de ambos resulta en una sola capa de SIG para el Factor-LS.
- **Factor K** – La base de datos de suelos SOTERLAC incluye el factor de erosividad (Factor-K), el cual representa la susceptibilidad del suelo a la erosión y las lluvias. Este factor es un parámetro promedio integrado basado en varios procesos erosivos e hidrológicos diferentes. Un Factor-K bajo (alrededor de 0.05 a 0.2) indica una resistencia alta a la erosividad y un Factor-K alto (alrededor 0.4 o más) indica un suelo muy erosivo. N-SPECT desarrolló una cuadrícula GRID basada en el Factor-K para calculaciones RUSLE.
- **Factor-R** – El modelo N-SPECT requiere de una capa de SIG representando la precipitación pluvial y la erosión en el área de estudio. Esta es una variable que debe ser adquirida y/o desarrollada por el usuario. El Factor-R representa el promedio anual de los efectos erosivos que tienen las tormentas, y está basado en un índice de erosividad (EI); el EI se calcula a partir de la energía cinética de las tormentas y su intensidad máxima durante 30 minutos. Cuando este análisis se hizo, esta información no existía para la región del Arrecife Mesoamericano, de tal manera que se desarrolló un método alternativo para estimar el Factor-R. El método de desarrollo del Factor-R está descrito en la siguiente sección.
- **Factor-C** – Cada tipo de cobertura terrestre, por ejemplo bosques, praderas, o tierra apta para cultivos, tiene un factor asociado con la cobertura, o un Factor-C. Este factor es un grado de erosividad relacionado con cada tipo de cobertura terrestre (Ver Tabla 1). Las tierras cultivadas, con un Factor-C de .240 están calificadas como sesenta veces más erosivas que los bosques, que tiene un Factor-C de .004. Los Factores-C para la cobertura terrestre para este análisis en la región

---

<sup>7</sup> Ward, Andrew D., and Stanley W. Trimble. *Environmental Hydrology*, Segunda Ed. CRC Press, LLC. 2004.

MAR fueron adaptadas de los Factores-C provistos por NOAA en N-SPECT. El uso de promedios erosivos en derivados locales sería un valor interesante en el modelo.

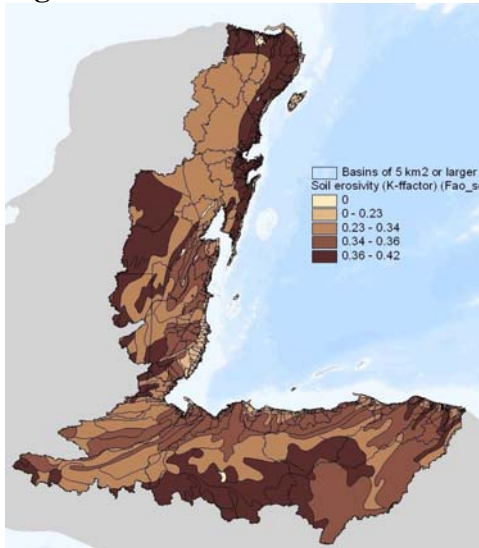
- **Factor-P** – RUSLE incluye un factor de prácticas de apoyo o Factor-P, que permite incluir la gran influencia de que ejercen algunas prácticas de conservación (como siembra de surcos y agricultura de terrazas) que controlan o mitigan la erosión. El factor y módulo de “Prácticas de apoyo” no se encuentran disponibles en la versión actual de N-SPECT. Por este motivo, el análisis se enfocó en los efectos de los cambios en cobertura terrestre en descarga de sedimentos contaminantes en la boca de los ríos adyacentes a la región del Arrecife Mesoamericano. Por otra parte, la información sobre prácticas de manejo específicas a través de la región del Arrecife Mesoamericano es limitada.

**Tabla 1. Coeficientes del Factor-C en N-SPECT**

Código	Categoría de cobertura terrestre	Factor de cobertura (Cover-Factor)
3	Baja intensidad desarrollada	0.030
4	Tierras cultivadas	0.240
5	Praderas	0.050
7	Bosques	0.004
9	Matorrales	0.014
10	Bosques de humedales	0.003
17	Terreno descubierto	0.700
18	Agua	0.000

Fuente: USDA Manual de Agricultura No. 703

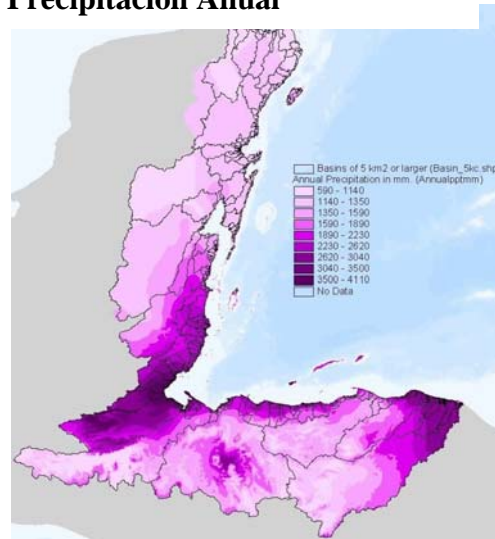
**Figura 2. Factor de Erosividad del Suelo (Factor-K)**



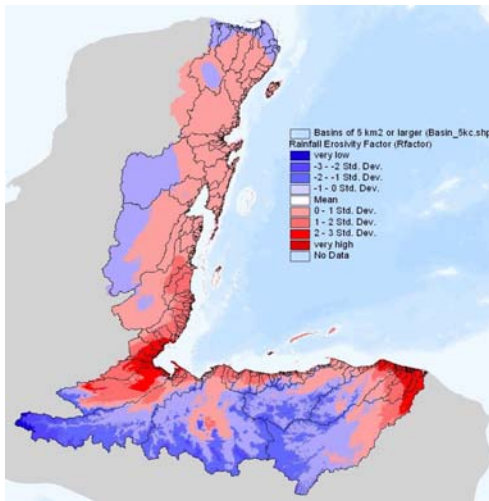
## Erosividad Pluvial y Precipitación

**Escenario de precipitación:** El modelo N-SPECT requiere de una serie de información sobre la precipitación en formato de retícula o celdas: la especificación del tipo de lluvia en la región (desde cuatro distribuciones sintéticas de 24-hr); y del promedio de “número de días de lluvia”, el cual es complicado debido a las grandes áreas y el amplio rango de precipitación en la región. Todas las corridas anuales del modelo fueron conducidas usando como base una cuadrícula del promedio de lluvia anual a largo plazo (el cual necesita ser especificado en pulgadas para el modelo N-SPECT), y el número de días lluviosos por año establecido en 40.<sup>8</sup> EL número de días lluviosos fue seleccionado basándose en la calibración del modelo de la región del Arrecife Mesoamericano por Will Heyman y Shin Kobara de la Universidad A&M de Texas.<sup>9</sup>

**Figura 3. Distribución de la Precipitación Anual**



**Figura 4. Erosividad Pluvial (Factor-R)**



**Factor-R:** El Factor-R se derivó empíricamente basándose en la precipitación anual y la elevación del terreno utilizando una ecuación para la erosividad pluvial en Costa Rica. Los colaboradores del proyecto en la Universidad A&M de Texas validaron estadísticamente el factor-R resultante para la región del Arrecife Mesoamericano y encontraron que esta ecuación es un método estadístico válido para el estimar la erosividad de RUSLE para la región.<sup>10</sup> La ecuación utilizada para estimar el Factor-R se puede encontrar en las notas técnicas al final de este informe.

<sup>8</sup> La información sobre precipitación para el modelo N-SPECT debe estar en pulgadas. La variable “número promedio de tormentas en la localidad por año” en el modelo requiere de un solo número de los días lluviosos para toda el área de estudio. El modelo se usó seleccionando el “tipo de lluvia II”, ya que representa de mejor manera las áreas con lluvias intensas.

<sup>9</sup> Ver documento en *Hydrologic Model Calibration* en el CD de datos *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef*.

<sup>10</sup> *Ibid.*

## Vulnerabilidad del Terreno a la Erosión

El modelo N-SPECT evalúa la erosión y los contaminantes provenientes del terreno en una cobertura terrestre determinada. El proyecto también evalúa la vulnerabilidad innata del terreno a la erosión en base en la inclinación de la pendiente, la erosividad del suelo y la precipitación anual. Esta simplificación de la ecuación RUSLE utilizada en el modelo N-SPECT excluye a la cobertura terrestre, lo que permite identificar áreas vulnerables en donde tendría que evitarse la conversión a una cobertura terrestre con más erosividad; o en áreas que ya han sido convertidas, es necesario implementar mejores prácticas de manejo.

### Ecuación 2: Vulnerabilidad de la tierra a la erosión

$$\text{Vulnerabilidad} = R * K * S^{\text{Exponente } 0.6}$$

*R* – Factor de descarga pluvial

*K* – Factor de erosividad del suelo

*S* – Inclinación (en grados)

## Modelos de Escorrentía y Descarga de Contaminantes

El modelo N-SPECT evalúa la escorrentía basándose en las características del suelo, la cobertura terrestre, la topografía y la precipitación. Los cálculos de escorrentía están basados en curvas desarrolladas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos; estas curvas reflejan la permeabilidad general de un tipo de suelo determinado.<sup>11</sup> Las curvas también están asociadas con la clasificación del grupo hidrológico del suelo (A, B, C ó D), el cual es una medida del potencial del drenaje, o del grado de filtración que puede tener el suelo. Los suelos en el grupo A poseen buen drenaje, mientras que suelos en el Grupo D poseen un drenaje pobre y tienen tendencia a inundarse. Los grupos hidrológicos son atributos contenidos en la base de datos de suelos del grupo SOTERLAC. Las curvas de permeabilidad dependen también en los tipos de cobertura terrestre. El modelo N-SPECT selecciona automáticamente las curvas para calcular la escorrentía basándose en las combinaciones del grupo de suelo hidrológico y los grupos de cobertura terrestre en cada celda de la retícula. Las curvas usadas se encuentran en la Tabla 2.

---

<sup>11</sup> Ver *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55, USDA-Natural Resource Conservation Service (NRCS)* en el CD de datos del *Análisis de Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano*.

**Tabla 2. Coeficiente de Curvas de Descarga Usados en el Modelo N-SPECT por Tipo de Cobertura Terrestre y Grupo de Suelo Hidrológico**

Código	Categoría de cobertura terrestre	CN-A	CN-B	CN-C	CN-D
3	Baja intensidad desarrollada	0.61	0.75	0.83	0.87
4	Tierras cultivadas	0.67	0.78	0.85	0.89
5	Praderas	0.39	0.61	0.74	0.80
7	Bosques	0.30	0.55	0.70	0.77
9	Matorrales	0.30	0.48	0.65	0.73
10	Bosques de humedales	0.00	0.00	0.00	0.00
17	Tierra descubierta	0.77	0.86	0.91	0.94
18	Agua	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55, USDA-NRCS*

N-SPECT evalúa la cantidad de contaminantes basados en esorrentía, cobertura terrestre, y topografía. Los coeficientes que representan las contribuciones de cada clase de cobertura terrestre a la descarga de contaminantes (Nitrógeno, Fósforo y total de sólidos suspendidos) son capturados en un banco de datos de cobertura terrestre como una medida aproximada de la cantidad de contaminantes. Estos coeficientes reflejan el promedio de concentración de contaminantes en cada tipo de cobertura terrestre, y provienen de estudios e investigaciones publicadas por NOAA y están incluidos en el modelo N-SPECT. Esto quiere decir que el modelo puede ser más preciso utilizando estos coeficientes de contaminantes derivados locales; sin embargo, esta información no está disponible para la región del Arrecife Mesoamericano. El proceso que se siguió para derivar los coeficientes está descrito en la *Guía Técnica* del modelo N-SPECT en el CD *Análisis de Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano*.

**Tabla 3. Coeficientes de Contaminantes: Fósforo, Nitrógeno, y Total de Sólidos Suspendidos (TSS)**

Clase		Coeficientes		
Valor	Nombre	Fósforo	Nitrógeno	TSS
3	Baja intensidad desarrollada	0.18	1.77	19.1
4	Tierras cultivadas	0.42	2.68	55.3
5	Praderas	0.48	2.48	55.3
7	Bosque	0.05	1.25	11.1
9	Matorrales	0.05	1.25	11.1
10	Bosques de humedales	0.20	1.10	19.0
17	Tierra descubierta	0.12	0.97	70.0
18	Agua	0.00	0.00	0.0

Fuente: *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55, USDA-NRCS*

## **Modelo de Circulación**

La universidad de Miami adaptó un modelo de circulación para examinar el transporte de materia suspendida a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano (materia suspendida incluye sedimentos suspendidos, detritus orgánico y nutrientes disueltos). El Sistema Regional del Modelo Marino (*Regional Ocean Modeling System -ROMS*) proporciona modelos espaciales y temporales de la circulación oceánica y el transporte— a través de corrientes—de la descarga de los ríos a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano. El modelo incorpora varios ambientes marinos como son los arrecifes coralinos de barrera, las lagunas de arrecifes, las aguas adyacentes al océano, así como la topografía de fondo (batimetría) a una resolución de 1 kilómetro. La resolución horizontal de la simulación es de 2 kilómetros (tamaño de la celda en la retícula).<sup>12</sup> El modelo incluye variables del estado del océano (temperatura, salinidad, corrientes y mareas) y los flujos de la superficie (vientos, lluvia, flujos en la radiación solar y de calor) para la simulación de las aguas marinas y costeras. Esta información fue tomada de la climatología oceánica y atmosférica de Levitus,<sup>13</sup> que proporciona promedios mensuales a largo plazo a lo largo de un año. La descarga mensual de los ríos y el transporte de sedimento (usado como un indicador del transporte de materia suspendida) fueron incorporados a partir del modelo N-SPECT.<sup>14</sup> En el modelo ROMS, los ríos se consideraron como puntos de origen. El rastreo de la dispersión de la materia suspendida es calculado en ROMS como transporte hidrodinámico pasivo.<sup>15</sup>

A partir de estos métodos, el modelo produce las condiciones promedio a largo plazo (climatología) de la circulación y transporte de la materia suspendida en la región del Arrecife Mesoamericano. Para entender la respuesta marina al transporte de sedimentos dependiendo de las diferentes coberturas terrestres y tormentas, se hicieron cuatro simulaciones numéricas. La primera simulación se hizo con información de condiciones “existentes” (cubierta terrestre durante 2003/4 y precipitación pluvial promedio mensual). Se hicieron simulaciones en el modelo por dos años para encontrar una representación válida del equilibrio de la acumulación de la descarga de sedimento que es transportado por los ríos. El modelo alcanzó el equilibrio en materia suspendida durante el invierno del segundo año. A partir de ahí, se hicieron simulaciones para capturar la descarga y transporte de sedimento asociado con a) un escenario de “condiciones actuales”, b) un escenario de “sostenibilidad primero”, c) el Huracán Keith, y d) el Huracán Mitch.

---

<sup>12</sup> La resolución vertical del modelo ROMS varía con la distancia de la orilla.

<sup>13</sup> Para más información sobre la climatología marina y atmosférica de Levitus, consulte <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/LEVITUS94/> (climatología marina) y <http://icoads.noaa.gov/status.html> (climatología atmosférica).

<sup>14</sup> Los valores estimados del transporte de sedimento (erosión total dentro de la cuenca hidrológica) es información de entrada en el modelo ROMS. Es posible que el transporte de sedimento este sobreestimado, sin embargo, estos valores proporcionan una indicación relativa de los patrones estacionales y la magnitud del transporte de sedimento. Dentro del modelo ROMS, el sedimento se consideró un indicador de material suspendida; Materia suspendida incluye sedimentos suspendidos, detritus orgánico y nutrientes disueltos.

<sup>15</sup> El “buscador de transporte hidrodinámico pasivo” del modelo ROMS usa un esquema de “advección-difusión” que captura el transporte por la corriente (advección) y la dispersión debido a la turbulencia (difusión). Con los resultados del modelo ROMS, las diferentes fuentes de material suspendido (desembocadura de los ríos) y el destino final (arrecifes) está conectado a través de una matriz.

## **Calibración y Validación del Modelo**

Toda modelación compleja y de múltiples escalas debe ser validada en cada paso del análisis. Este análisis es útil para integrar una gran variedad de datos, y adaptar herramientas de modelaje para crear un análisis regional e innovativo. En nuestro caso, en la medida de lo posible se utilizó información publicada y/o indicadores aproximados de teledetección para calibrar y validar los resultados del modelo; la información de entrada del análisis se describe más adelante. Un aspecto importante del proyecto, sin embargo, es el de proporcionar todas estas herramientas de modelaje a los colaboradores en la región del Arrecife Mesoamericano, de manera que ellos puedan aplicar estas herramientas a una resolución más alta, y usen información local para calibrar y validar los resultados del modelo. Los resultados regionales de este análisis deben considerarse preliminares e indicativos de patrones generales de erosión y transporte y descarga de sedimento y nutrientes a lo largo de la región.

- 1- **Evaluación de la información de entrada en el modelo.** Este análisis utilizó la mejor información disponible a nivel regional. Toda la información de entrada (elevación, ríos, precipitación, suelos, y cobertura terrestre) fué evaluada con relación a la precisión espacial y la consistencia de sus atributos. No se identificó ninguna limitación en la información de entrada que afectara significativamente los resultados del modelo.<sup>16</sup>
- 2- **Calibración de los Parámetros de Transporte y Precipitación.** Los estimados de descarga y erosión dependen en gran medida de dos parámetros- el factor de erosividad de la precipitación (Factor-R), y el número de días lluviosos por año. Colaboradores del proyecto en la Universidad A&M de Texas pusieron a prueba los parámetros de entrada del modelo (Factor-R y el número de días lluviosos por año) para calibrar los componentes del modelo que tienen que ver con el transporte y la descarga de sedimento. Se encontró que los parámetros examinados tuvieron una buena correlación con las predicciones de descarga provenientes de un modelo de balance de agua, y con estimaciones de erosividad.<sup>17</sup> Esta calibración está descrita en mayor detalle en el documento “Calibración del Modelo Hidrológico” (*Hydrological Model Calibration*) en el CD *Análisis de las Cuencas Hidrológicas del Arrecife Mesoamericano*.
- 3- **Validación de descarga de los Ríos.** Los valores de descarga de los ríos a partir del modelo N-SPECT fueron comparados con los valores estimados usando un

---

<sup>16</sup> La información del SRTM y la información sobre elevación derivada de radar tienen inexactitudes intrínsecas debido a la detección de estructuras hechas por el hombre como son edificios. Estas inexactitudes afectan hasta cierto grado las estimaciones de las pendientes pero, en general, no afectan significativamente los resultados del modelo.

<sup>17</sup> La Ecuación del Balance de Agua fué desarrollada por Thattai, Deeptha, Björn Kjerfve, W.D. Heyman, 2003. Hydrometeorology and variability of water discharge and sediment load in the Inner Gulf of Honduras. Western Caribbean. *Journal of Hydrometeorology* 4:985-995. Los valores estimados de erosividad provienen de Mikhailova, E.A., R.B. Bryant, S.J. Schwager, and S.D. Smith. 1997. Predicting rainfall erosivity in Honduras. *Soil Science Society of America Journal*. 273-279.



modelo de balance de agua<sup>18</sup> que ha sido comparado con información real de descargas de seis cuencas hidrológicas en el Golfo de Honduras. Los valores estimados de descarga tuvieron patrones comparables y estuvieron, en general, dentro del veinticinco por ciento de los valores estimados que han sido publicados por otros.

- 4- **Tasas Locales de Erosión y Escorrentia de Contaminantes.** El modelo N-SPECT estima las fuentes de erosión dependiendo de la aplicación de RUSLE. Por otro lado, los valores estimados de la descarga de de contaminantes dependen de la aplicación de curvas de descarga desarrolladas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*US Agriculture Department – USDA*). Ambas técnicas son ampliamente usadas. En el futuro, las ecuaciones utilizadas en estas técnicas podrían ser más exactas si se usan coeficientes derivados localmente para la erosión y contaminantes, sin embargo, esta información no existe para la región del Arrecife Mesoamericano. Aunque sólo existe información local limitada para la validación de nuestros valores estimados, en general, los valores obtenidos la erosión, y de descarga de Nitrógeno y Fósforo (fuentes) están dentro de los límites razonables de estimaciones hechas para otras áreas.<sup>19</sup>
- 5- **Descarga de Contaminantes en la Desembocadura de los Ríos.** Una limitada cantidad de información está disponible para validar los resultados del modelo. Se compararon los resultados de la descarga de los ríos con información de campo del Estudio Científico sobre la Interconexión entre las Cuencas Hidrológicas y los Arrecifes (*Watershed Reef Interconnectivity Scientific Study – WRIScS*)<sup>20</sup> y el modelaje conducido por Thattai et al.<sup>21</sup> Los valores estimados de descarga y producción de sedimento (por unidad de área) fueron comparados con valores estimados para cuencas de tamaño similar y con gradientes similares en varias partes del mundo.<sup>22</sup> Los valores estimados para la descarga de sedimento derivados del modelo N-SPECT fueron más altos de lo esperado en las cuencas hidrológicas más grandes de la region. Una limitación clave del modelo N-SPECT es que no cuenta adecuadamente la atenuación (pérdida o re-depósito) del sedimento y los nutrientes dentro de la cuenca hidrológica en la medida que se

---

<sup>18</sup> Thattai, Deeptha, Björn, Kjerfve, W.D. Heyman, 2003. Hydrometeorology and variability of water discharge and sediment load in the Inner Gulf of Honduras, Western Caribbean. *Journal of Hydrometeorology* 4:985-995.

<sup>19</sup> El rango razonable de los valores (bajo, típico y alto) se establecieron en base a la erosión (aplicando RUSLE), descarga de Nitrógeno (aplicando la ecuación de balance de Nitrógeno), y descarga de Fósforo (juntando resultados de RUSLE con los valores estimados de la concentración de Fósforo en el suelo).

<sup>20</sup> Nunny, R., M. Santana, P. Stone, D. Tillet, and P.D. Walling. 2001. *An Investigation of the Impact of Reef Environments of Changing Land Use in the Stann Creek District in Belize*. Technical Report Module 3. The Watershed Reef Interconnectivity Study (WRIScS) 1997-2000.

<sup>21</sup> Thattai, Deeptha, Björn Kjerfve, W.D. Heyman, 2003. Hydrometeorology and variability of water discharge and sediment load in the Inner Gulf of Honduras. Western Caribbean. *Journal of Hydrometeorology* 4:985-995.

<sup>22</sup> J.D. Milliman and J.P.M. Stvitski. 1992. Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. In *The Journal of Geology*, 1992. volume 100, p. 525-544.

dirigen a la desembocadura del río.<sup>23</sup> Es posible que los valores del modelo sobreestimen más los sedimentos que los nutrientes puesto que los sedimentos más grandes son más afectados por la redistribución del Nitrógeno (en solución) ó el Fósforo (pegado a pequeñas partículas de suelo). Los resultados del modelo N-SPECT, por lo tanto, indican el parámetro más alto, o el escenario para el peor de los casos de la descarga de sedimentos. La producción (por unidad de área) de Nitrógeno y Fósforo están dentro de los límites razonables dados los parámetros esperados de descarga descritos arriba. Los valores estimados de producción y descarga de sedimento por cuenca hidrológica parecen ser altos, en particular en el caso de la cuenca hidrológica más grande. Es posible que en las cuencas hidrológicas más grandes la descarga de sedimento este sobre estimado por un factor de entre dos y cuatro. Por lo tanto, los valores estimados de descarga de sedimento y nutrientes en la desembocadura de los ríos indican los patrones relativos y el orden de magnitud, pero no deben ser usados como valores exactos y/o absolutos.

- 6- **Transporte de Sedimentos al Arrecife.** Los resultados del modelo ROMS con relación a la extensión de materia suspendida que alcanza el Arrecife Mesoamericano están siendo comparados con los mapas de Materia Detrital de Color (*Colored Detrital Matter – CDM*)<sup>24</sup> derivados del sensor de teledetección *Sea-viewing Wide Field-of-view* (SeaWiFS). Se utilizó el Algoritmo de Optimización de Espectro (*Spectral Optimization Algorithm – SOA*)<sup>25</sup> para procesar la información SeaWiFS en las aguas del Caribe que son ópticamente complejas.<sup>26</sup> El producto resultante,  $a_{CDM}(443)$  (llamado CDM) es un coeficiente de absorción que sirve como una aproximación del transporte de materia suspendida. La Figura 5 muestra la diferencia entre la descarga mensual de los ríos y el CDM promedio en las imágenes de SeaWiFS que se procesaron.

---

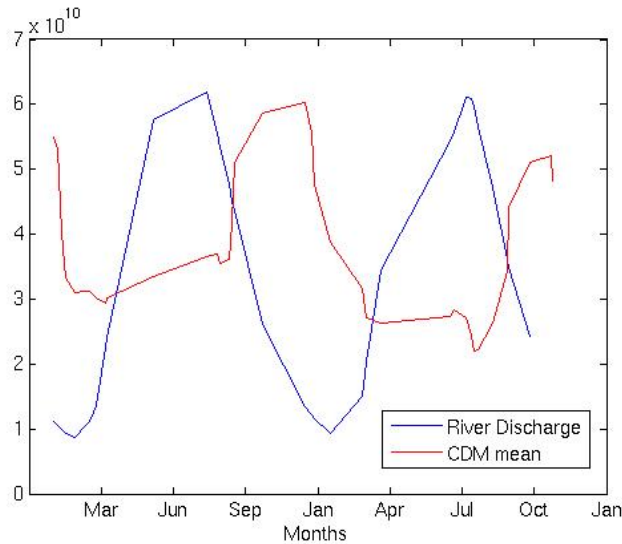
<sup>23</sup> El modelo N-SPECT aplica una proporción de descarga de sedimento a cada celda individual de la retícula para ajustar la carga de sedimento; sin embargo, esto no sucede a lo largo de toda la cuenca puesto que los sedimentos pueden ser re-depositados en la medida que el sedimento se dirige a la desembocadura del río.

<sup>24</sup> CDM incluye carbono orgánico disuelto proveniente del suelo y plantas; este carbono también se conoce como Materia Orgánica Disuelta de Color (*Colored Dissolved Organic Matter – CDOM*), más partículas de detritus (material orgánica muerta).

<sup>25</sup> Kuchinke, C.P., H.R. Gordon, L.W. Harding Jr., and K.J. Voss, A compiled oceanic and atmospheric spectral optimization algorithm for ocean color imagery in Case 2 waters: a validation for Chesapeake Bay. PROPUESTO PARA PUBLICACIÓN. *Remote Sensing of Environment* (2006).

<sup>26</sup> Aguas ópticamente complejas contienen una multitud de componentes como material orgánica disuelta de color y fitoplancton.

**Figura 5. Relación Temporal entre los Valores Estimados de Descarga de Ríos Usando N-SPECT y el Coeficiente de Absorción de Materia Detrital de Color (CDM) , derivado de Imágenes de Satélite del Norte de Honduras**



Fuente: Universidad de Miami, 2006.

La clasificación de CDM a partir de imágenes de satélite de SeaWiFS se usa para evaluar dos aspectos de los resultados del modelo ROMS de circulación marina. (1) La variabilidad estacional de los patrones de dispersión de plumas de la materia suspendida, y (2) la variabilidad estacional de la concentración total de la materia suspendida. Las plumas de materia suspendida del modelo de simulación ROMS se compararon con las clasificaciones de CDM a lo largo de transectos perpendiculares a la costa.

Los patrones estacionales son similares entre las plumas de materia suspendida generadas a partir de ROMS y las tendencias estacionales observadas en la información de SeaWiFS, aunque existe considerable variabilidad anual en esta última. En general, el modelo concuerda muy bien con las observaciones en relación con el tiempo y la localidad. Sin embargo, existen algunas discrepancias en relación con la estructura del gradiente de la pluma. Si se compara la posición más extrema del promedio de la pluma CDM estimada a partir de SeaWiFS, con las plumas de materia suspendida estimadas por el modelo, los resultados de CDM varían estacionalmente entre 10 y 40 kilómetros, mientras que las plumas modeladas con ROMS son en su mayoría de casi 40 kilómetros de ancho. Es posible que estas diferencias se deban a al coeficiente de difusión usado en el modelo ROMS, el cual es muy pequeño. La validación del modelo de circulación está descrita con más detalles en “*Dynamics of Buoyant Matter in the MAR Region*” en el CD de datos del *Análisis de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano*.”

## ***Limitaciones del Análisis***

Cualquier modelo con múltiples etapas tendrá siempre inexactitudes, y es vital que los usuarios estén conscientes de las limitaciones del modelo y usen los resultados apropiadamente.

### **Limitaciones del Modelo Hidrológico**

Una limitación clave del modelo N-SPECT es que el modelo no incorpora adecuadamente la disminución de nutrientes (pérdida o redistribución) en la cuenca hidrológica durante el trayecto hacia la desembocadura del río. Como resultado, los valores estimados de la descarga de sedimento y nutrientes en la desembocadura del río son exagerados. Los valores absolutos no son precisos, pero sí sirven como un indicador general de la magnitud y los patrones de la descarga de sedimento y nutrientes en la región. Aunque no son exactos, los valores estimados son útiles para examinar los patrones relativos y las implicaciones de los diferentes escenarios de políticas ya que las estimaciones del porcentaje de cambio son válidas.

Una segunda limitación del modelaje es el énfasis en el papel que juega el cambio de cobertura terrestre sin considerar el efecto específico de las prácticas de manejo de uso de suelo. Para la región del Arrecife Mesoamericano, solo existe información sobre el tipo de cobertura terrestre y no existe información sobre las intervenciones específicas de manejo. El módulo de prácticas de manejo del modelo N-SPECT aún no se ha implementado. Además, no existe información detallada sobre la reducción en la erosión y descarga de nutrientes asociada con cada una de las prácticas de manejo agrícola. Una vez que exista esta información, sería posible evaluar los beneficios en el modelo tratando cada intervención de manejo para distintos tipos de cobertura terrestre (Factor-C) y coeficientes de contaminación para distintas categorías (por ejemplo cultivos de cítricos con control de erosión). Esta sería una extensión valiosa para éste análisis.

Otra limitación es que el modelo no considera las represas de agua, las cuales atrapan sedimento. Técnicamente, es posible desarrollar una función para incorporar las represas dado que existe información sobre tasas de retención de sedimento en las mismas. Esta aplicación podría ser importante para considerar en aplicaciones locales del modelo N-SPECT.

### **Limitaciones del Modelo de Circulación**

En relación a las limitaciones del modelaje en el Arrecife Mesoamericano, la primera es que el resultado se da en relación a las condiciones promedio a largo plazo (climatología). Es decir, la circulación es representativa de las condiciones más comunes que se pueden encontrar cada año si todos los eventos climatológicos extremos o inusuales fueran removidos. Los resultados del modelo reflejan condiciones promedio a largo plazo, por lo tanto, hacer comparaciones diarias entre el modelo de circulación y las observaciones actuales es irrelevante. Sin embargo, si se hacen comparaciones con observaciones durante el mismo mes durante varios años es posible derivar patrones comunes con los resultados del modelo.

La segunda limitación es la dispersión de las imágenes del CDM debido a la nubosidad en las imágenes de SeaWiFS. Sólo unas pocas imágenes de satélite al año son de buena calidad en la región del Arrecife Mesoamericano, y para la mayoría de los años no existen imágenes claras durante los meses de verano. Sin embargo, existen suficientes observaciones para recuperar las tendencias globales de las concentraciones en el CDM para un periodo de un año, como se puede apreciar en la Figura 5.

La tercera limitación es que no existe una relación directa entre el coeficiente de absorción del CDM y la concentración del CDM. Se necesita tener mediciones directas de muestras de agua, que no están disponibles todavía, para obtener tal información. Por lo tanto, solamente un modelo de circulación puede ser usado para estimar la materia suspendida que alcanza a los arrecifes.

Finalmente, en el modelo numérico la materia suspendida no se deposita ni se acumula, sino que es transportada constantemente hasta que sale del área. Sin embargo, es posible estimar la cantidad de materia suspendida que se acumularía basándose en mediciones sobre la cantidad de materia que pasa por una localidad determinada. El modelo y las observaciones reflejan la extensión máxima de la pluma y cuál es su comportamiento con el tiempo.

## **Resultados del Análisis**

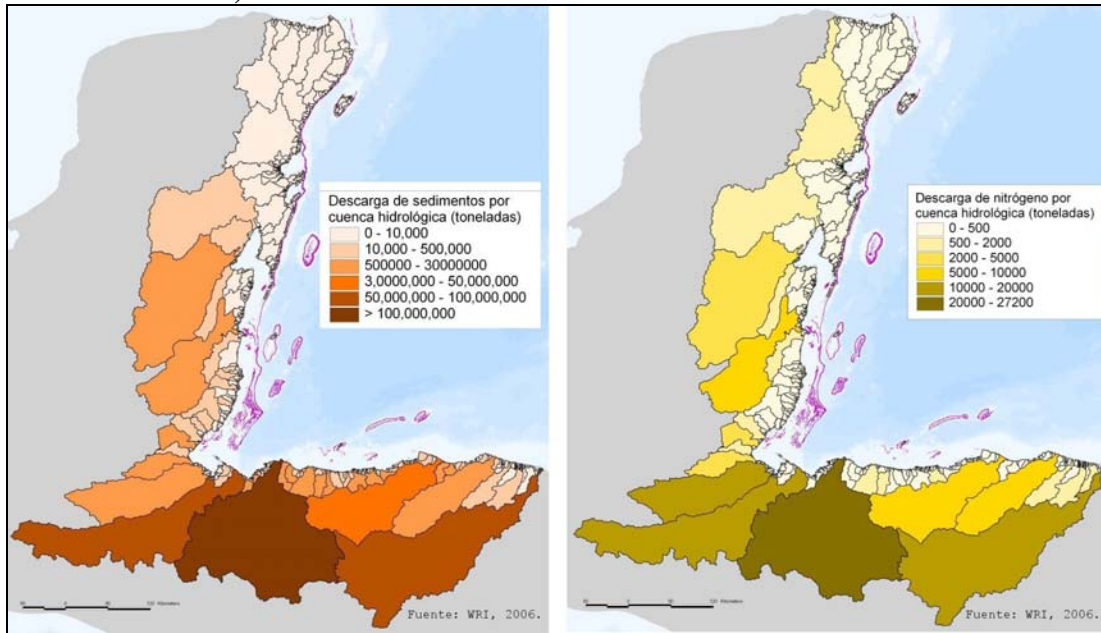
La presentación de los resultados se enfoca primero en la descarga de sedimentos y contaminantes al nivel de las cuencas para más de 400 desembocaduras de ríos a través de la región del Arrecife Mesoamericano. Inicialmente se examinó la descarga de sedimentos y contaminantes tomando en cuenta la cobertura terrestre actual (2003/04); subsecuentemente, estos datos se compararon con resultados derivados usando diferentes tipos de cobertura terrestre (cobertura terrestre “natural”, y los tres escenarios de cobertura terrestre para el año 2025). A continuación se examinó el transporte de sedimentos en las aguas costeras a través de la región. Finalmente, se hizo un análisis de la vulnerabilidad terrestre a la erosión, y una evaluación del origen local del sedimento y la polución.

### **1) Descarga de Sedimentos y Contaminantes en Base a la Cobertura Terrestre Actual (2003/04)**

El modelo N-SPECT fue utilizado para evaluar la acumulación de sedimentos de Nitrógeno (N), Fósforo (P), y el Total de Sólidos Suspendidos (*Total Suspended Solids* - TSS) en más de 400 cuencas hidrológicas de la región del Arrecife Mesoamericano. Los mapas en la Figura 6 muestran la acumulación relativa de sedimentos y Nitrógeno en la desembocadura de los ríos a través de la región. Se encontró que la cuenca hidrológica del Río Ulúa en Honduras es la más grande en cuanto a la contribución de sedimentos, Nitrógeno, Fósforo, y TSS. Otros ríos identificados como grandes depositarios de sedimentos y nutrientes son el Río Patuca (en Honduras), el Río Motagua (en Guatemala)

y Honduras), el Río Aguan (en Honduras), el Río Dulce (en Guatemala), el Río Belice (en Belice), y el Río Tinto o Negro (en Honduras). Los nombres de las cuencas hidrológicas se encuentran en el la Figura A en la sección de Hallazgos Clave.

**Figura 6. Descarga de Sedimentos y Nitrógeno por Cuenca Hidrológica (Cobertura Terrestre Actual)**



## **2) Comparación de Resultados entre la Cobertura Terrestre Actual (2003/04) y la Cobertura Terrestre Hipotética Natural**

Para evaluar los impactos de la alteración del paisaje por actividad humana sobre la descarga de sedimento y contaminantes en la desembocadura de los ríos a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano, el modelo N-SPECT se corrió utilizando dos escenarios de cobertura terrestre, a saber: la cobertura terrestre actual (2003/04) y una cobertura terrestre natural hipotética (sin alteraciones). La tabla 4 presenta la comparación de la distribución de la cobertura terrestre para dichos escenarios. La descarga de sedimentos, y contaminantes (Nitrógeno, Fósforo y TSS) para más de 400 desembocaduras de ríos está sintetizada en la Tabla 5. Las descargas asociadas a la alteración del paisaje por actividades humanas incrementó casi el doble. El modelo N-SPECT indica que la descarga de sedimentos aumentaría por un factor de 20, mientras que el Nitrógeno aumentaría por un factor de 3, Fósforo por factor de 7, y la TSS por un factor de 5.

**Tabla 4. Comparación de Cobertura Terrestre Natural y Actual (Porcentaje en Cada Tipo de Cobertura)**

<b>Categoría del terreno</b>	<b>Natural</b>	<b>Actual</b>
Desarrollado/Urbano	0.0%	0.3%
Tierras cultivadas	0.0%	32.4%
Praderas y sabanas	1.8%	1.6%
Bosques	82.4%	50.6%
Matorrales	8.3%	10.4%
Pantanos	6.0%	3.2%
Tierra al descubierto / playas / desconocidas	0.4%	0.3%
Agua	1.1%	1.2%

Fuente: ICRAN MAR, 2006

**Tabla 5. Comparación de los Resultados Regionales Usando Modelos Anuales en Cobertura Terrestre Actual y Cobertura Terrestre Natural**

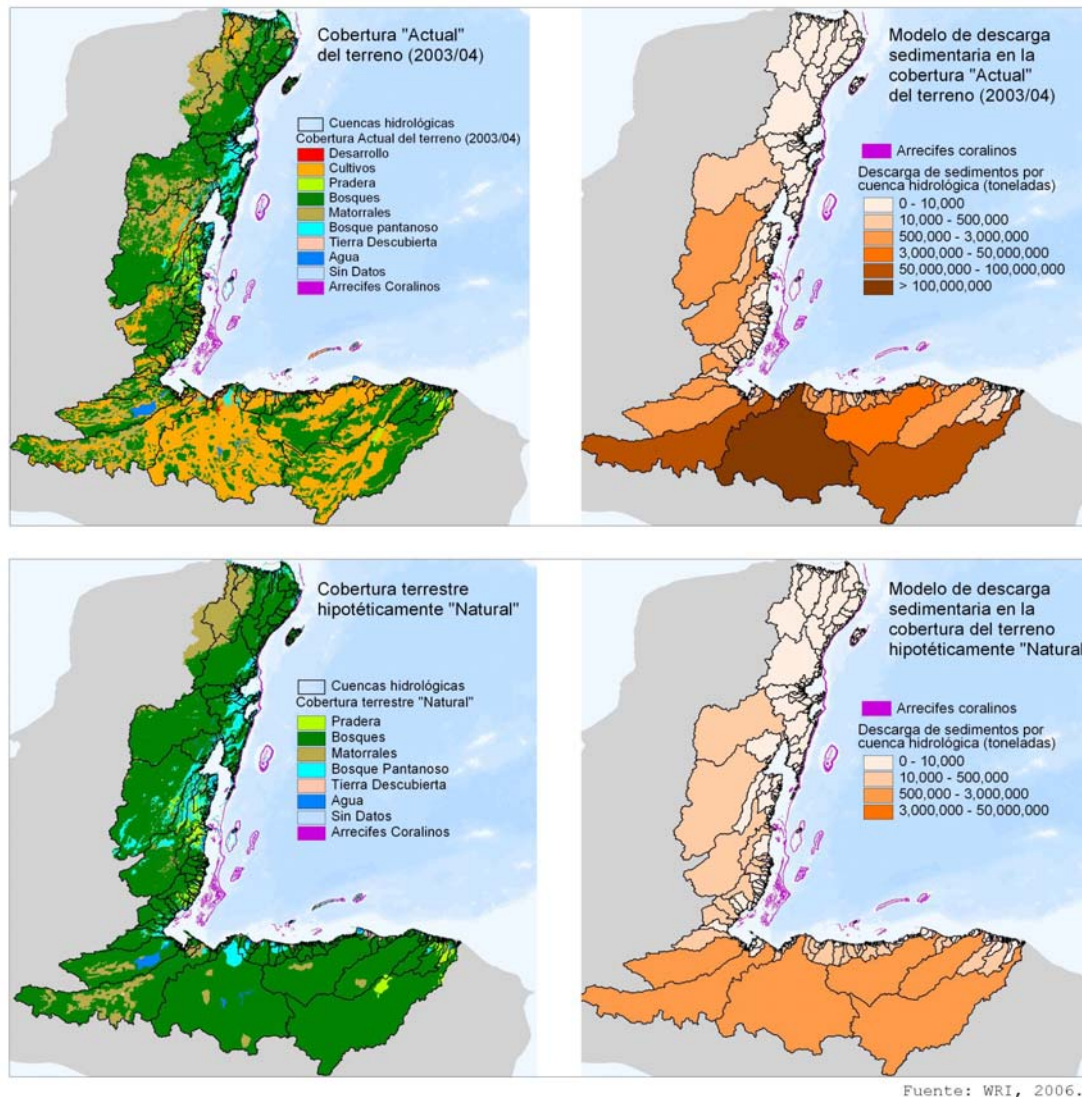
<b>Escenario</b>	<b>Descarga (x109 m3)</b>	<b>Sedimentos (x109 Tm)</b>	<b>Nitrógeno (x109 Tm)</b>	<b>Fósforo (x109 Tm)</b>	<b>TSS (x109 m)</b>
<b>Actual (2003/2004)</b>	<b>60</b>	<b>370</b>	<b>130</b>	<b>17</b>	<b>2,400</b>
<b>Natural (sin desarrollo)</b>	<b>34</b>	<b>17</b>	<b>45</b>	<b>2</b>	<b>470</b>
<b>Promedio entre Actual / Natural</b>	<b>2X</b>	<b>22X</b>	<b>3X</b>	<b>7X</b>	<b>5X</b>

Fuente: WRI, 2006

*Nota: la descarga de sedimento, N, P y TSS representa estimados en los límites superiores para la región; la pérdida de sedimentos y nutrientes debido la redistribución no estan considerados. Los valores reflejan la erosión general y la descarga de contaminantes dentro de la región y constituyen un indicador general de la magnitud de la descarga de sedimento y nutrientes pero no deben considerarse como valores absolutos. Sin embargo, la relación relativa entre los escenarios es válida.*

El mapa de la Figura 7 presenta resultados en cobertura terrestre y la descarga de sedimentos para ambas cobertura terrestres: actual y natural.

**Figura 7. Descarga de Sedimento Modelada a Partir de Cobertura Terrestre Actual y Natural**



### **3) Comparación entre la Cobertura Terrestre Actual y los tres Escenarios de Desarrollo para el Año 2025**

Los escenarios de los cambios de la cobertura terrestre a través de la región del Arrecife Mesoamericano en el año 2025 se utilizaron para evaluar los impactos de dichos cambios en la descarga de sedimentos y contaminantes. La Tabla 6 y la Figura 8 reflejan la distribución de la cobertura terrestre en los mismos escenarios. El modelo N-SPECT se aplicó a estos tres escenarios y los resultados se presentan en la Tabla 7. El modelo N-SPECT indica que el escenario de “Mercados Primero” resultaría en un aumento del 13 por ciento en descargas de sedimentos comparadas con el escenario de cobertura terrestre actual; por otro lado, la descarga de sedimentos sólo aumentaría un cinco por ciento bajo el escenario de “Políticas Primero”, y disminuiría un cinco por ciento bajo el escenario



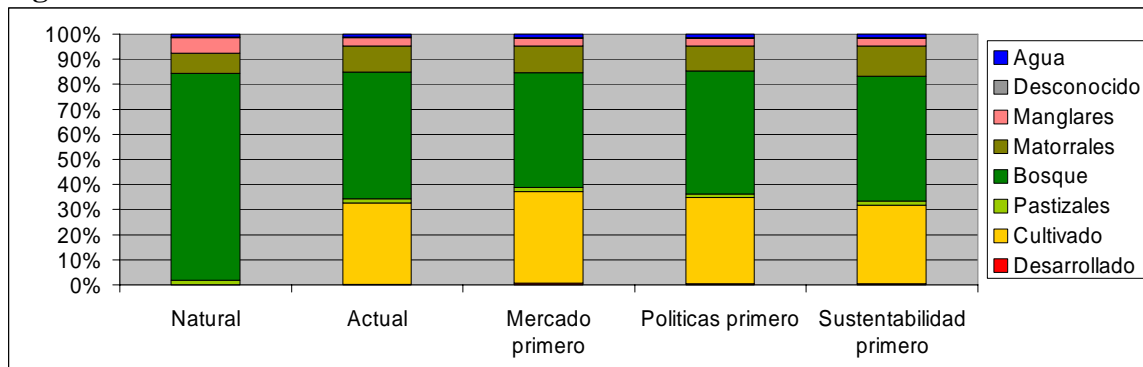
“Sustentabilidad Primero”. La descarga de nutrientes y de TSS también aumentarían en un porcentaje alto bajo el escenario de “Mercado Primero” (se espera un incremento entre 8-11 por ciento de aumento en descarga de Nitrógeno, Fósforo, y TSS). En el otro extremo se encontró que el escenario de “Sustentabilidad primero” podría resultar en una disminución de cuatro ó cinco por ciento en nutrientes y TSS en base, solamente, a los cambios en la cobertura terrestre. Se puede alcanzar reducciones de descarga de sedimento y nutrientes adicionales a través de la implementación de mejores prácticas de manejo agrícola, las cuales no fueron consideradas en éstos escenarios.

**Tabla 6. Comparación entre Escenarios de Cobertura Terrestre (Porcentaje de Cada Tipo de Cobertura)**

Tipo de Cobertura de Terreno	Actual	Mercado Primero	Políticas Primero	Sustentabilidad Primero
Desarrollo/Urbano	0.3%	0.6%	0.6%	0.5%
Cultivado (agricultura)	32.4%	36.7%	34.2%	31.3%
Sabana/ Pastizal	1.6%	1.5%	1.5%	1.7%
Bosque	50.6%	45.8%	48.9%	49.8%
Arbustivo	10.4%	10.6%	9.9%	11.9%
Terrenos Inundados / Manglares	3.2%	3.1%	3.2%	3.1%
Desnudo / Playa / Desconocido	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Agua	1.2%	1.4%	1.4%	1.4%

Fuente: ICRAN MAR, 2006

**Figura 8. Distribución de Cobertura Terrestre dentro de Cada Escenario**



**Tabla 7. Comparación de Resultados Regionales entre los Modelos Anuales de Cobertura Terrestre Actual y los Tres Escenarios para 2025**

Escenario	Descarga (x10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )	Sedimentos (x10 <sup>9</sup> Tm)	Nitrógeno (x10 <sup>9</sup> Tm)	Fósforo (x10 <sup>9</sup> Tm)	TSS (x10 <sup>9</sup> Tm)
Actual (2003/2004)	60	370	130	17	2,400
Mercados Primero	63	420	149	19	2,630
Porcentaje de Cambio	5%	13%	8%	11%	10%
Políticas Primero	61	390	135	18	2,480
Porcentaje de Cambio	2%	5%	3%	4%	4%
Sustentabilidad Primero	59	355	125	16	2,300
Porcentaje de Cambio	-2%	-5%	-4%	-5%	-4%

Fuente: WRI, 2006

*Nota: la descarga de sedimento, N, P y TSS representa valores estimaciones para los límites superiores para la región; la pérdida de sedimentos y nutrientes debido al redepósito no están considerados. Los valores reflejan la erosión general y la descarga de contaminantes dentro de la región y constituyen un indicador general de la magnitud de la descarga de sedimento y nutrientes pero no deben considerarse como valores absolutos. Sin embargo, la relación relativa entre los escenarios es válida.*

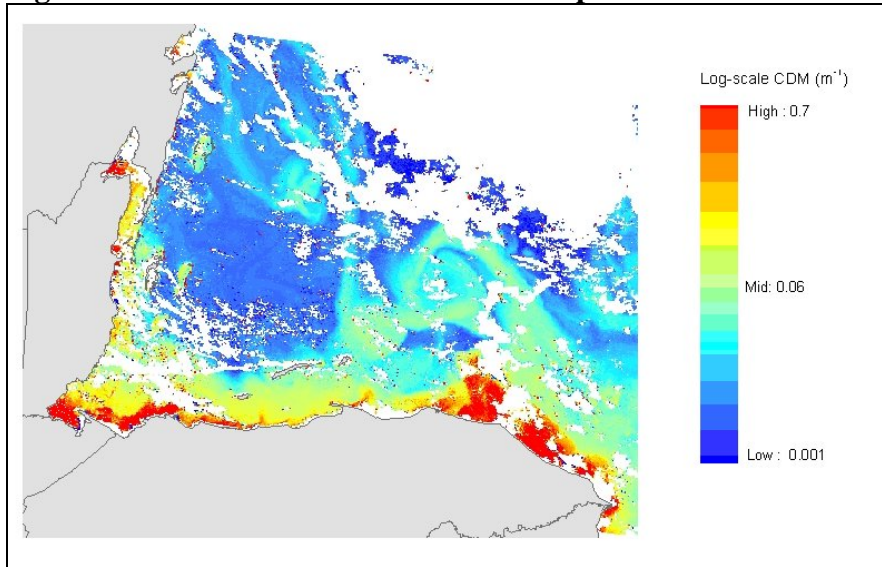
#### **4) Eventos Extremos**

Usando N-SPECT, WRI modeló la descarga, erosión y transporte de sedimentos durante episodios extremos de lluvia, como son los huracanes en la región del Arrecife Mesoamericano. Se implementó un análisis del Huracán Keith en Belice, cubriendo un área que se extiende sobre más de 90 cuencas hidrológicas.<sup>27</sup> Durante los cinco días que duró la tormenta (29 de Septiembre y el 3 de Octubre) se estimó que la descarga de las 90 cuencas hidrológicas fue aproximadamente 30 por ciento de la descarga normal anual (modelada), mientras que el total de sedimento transportado fue de casi 50 por ciento de la descarga normal anual. También se evaluó el impacto de la precipitación durante el Huracán Mitch (27-30 de Octubre de 1998) en más de 100 cuencas hidrológicas en Honduras.<sup>28</sup> Se estimó que la descarga ocasionada por este evento fue de casi un tercio del total anual normal (modelado), y el volumen estimado de sedimento descargado fue de casi dos tercios del promedio que el modelo predijo para ese año. Este análisis resalta el impacto significativo que tienen eventos de tormenta grandes sobre el transporte y descarga de sedimento en la zona costera. La Figura 9 muestra la extensión de la pluma de CDM el 10 de Noviembre de 1998, casi dos semanas después del Huracán Mitch.

<sup>27</sup> El Departamento de Meteorología de Belice proporcionó la información sobre la precipitación durante el Huracán Keith.

<sup>28</sup> El *US Geological Survey* proporcionó información sobre la precipitación durante el Huracán Mitch.

**Figura 9. Extensión de la Pluma de CDM para el 10 de Noviembre de 1998**

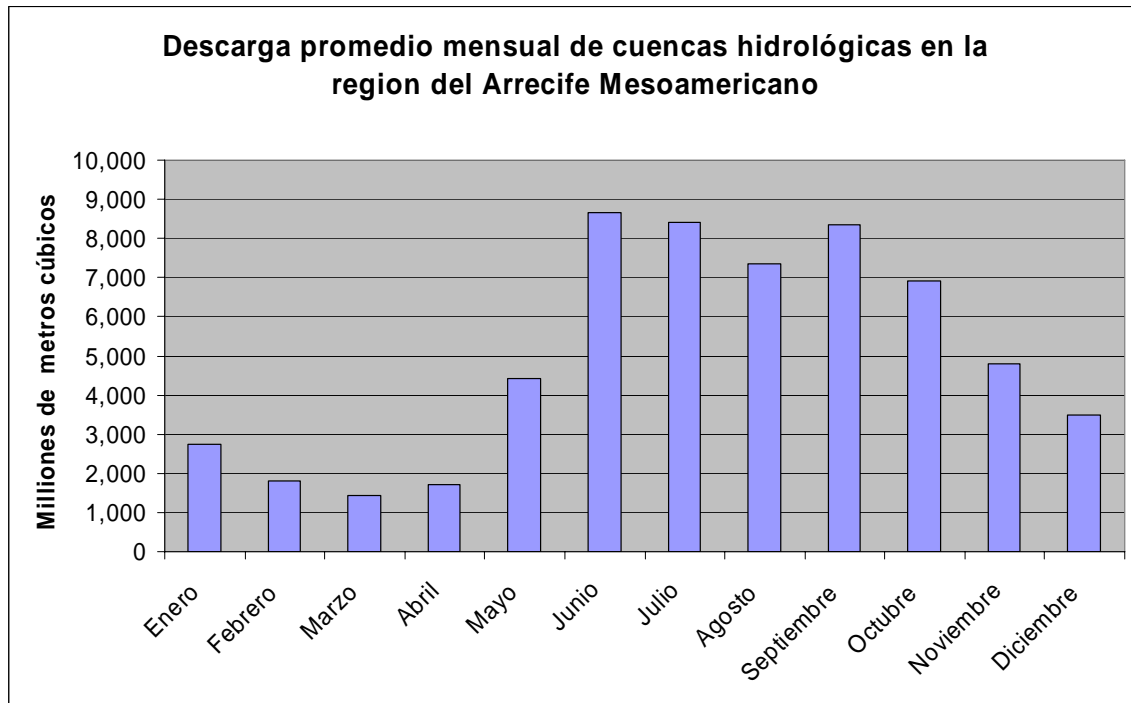


Extensión de la pluma de la Materia detrítica de color (CDM) en base a imágenes de SeaWiFS por Christopher Kuchinke, Universidad de Maryland. Nota: El Algoritmo de Optimización Espectral (SOA) reemplaza por completo la corrección atmosférica “estándar” de SeaWiFS y el algoritmo bio-óptico.

### **5) Transporte de Materia Suspendida en el Arrecife Mesoamericano**

WRI aplicó el modelo N-SPECT a valores mensuales para estimar el promedio mensual de la descarga de los ríos y la descarga de sedimentos para los escenarios de cobertura terrestre “actual” y de “sustentabilidad primero.” Los resultados se introdujeron en el modelo de circulación marina (ROMS) de la Universidad de Miami para predecir el transporte de la material suspendida a lo largo del Arrecife Mesoamericano. Los resultados del modelo ROMS reflejan la variabilidad estacional de la extensión y la concentración de la pluma de materia suspendida. Las animaciones de la circulación de la material suspendida anual están disponibles en el CD *Análisis de las Cuencas Hidrológicas del Arrecife Mesoamericano*. Una descripción más detallada de la aplicación del modelo de circulación ROMS, los resultados, así como también las observaciones en los patrones de circulación de SeaWiFS se encuentran en el documento “Dinámica de la material suspendida en la región del Arrecife Mesoamericano” en el mismo CD.

**Figura 10. Valores Estimados de Descarga Mensual Derivados de N-SPECT**

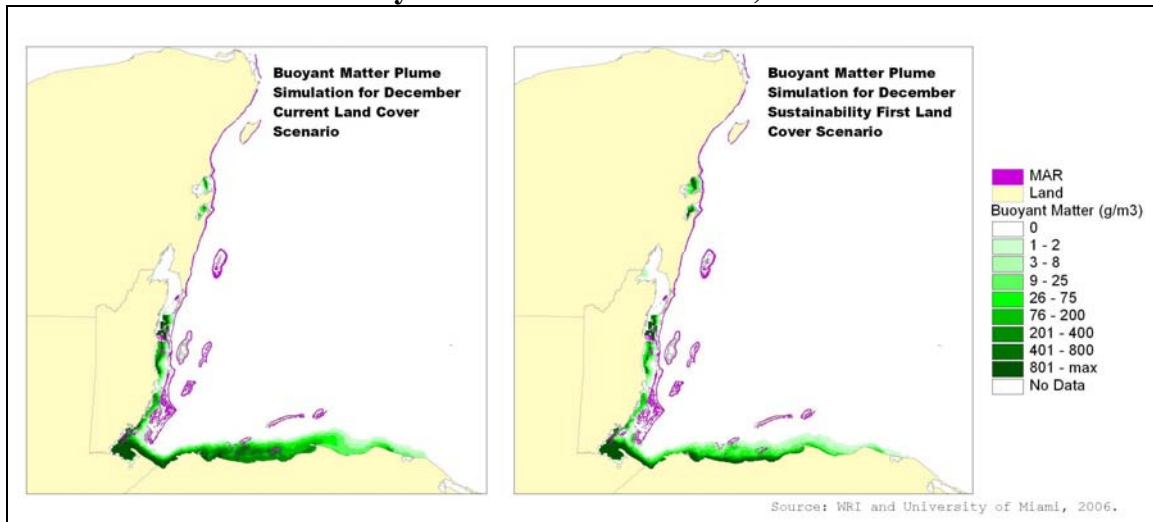


Fuente: WRI, 2006.

Los resultados del modelaje para los dos escenarios se pueden comparar para explorar el posible impacto de los cambios en el uso del suelo sobre la descarga modelada de material suspendido al Arrecife Mesoamericano. Se puede comparar la extension y concentración de la pluma en los dos escenarios mes por mes; también es posible derivar estadísticas anuales que reflejen la concentración media anual en cada localidad del arrecife, la concentración anual máxima, o el número de meses donde la concentración es mayor que algún límite (umbral) previamente determinado.

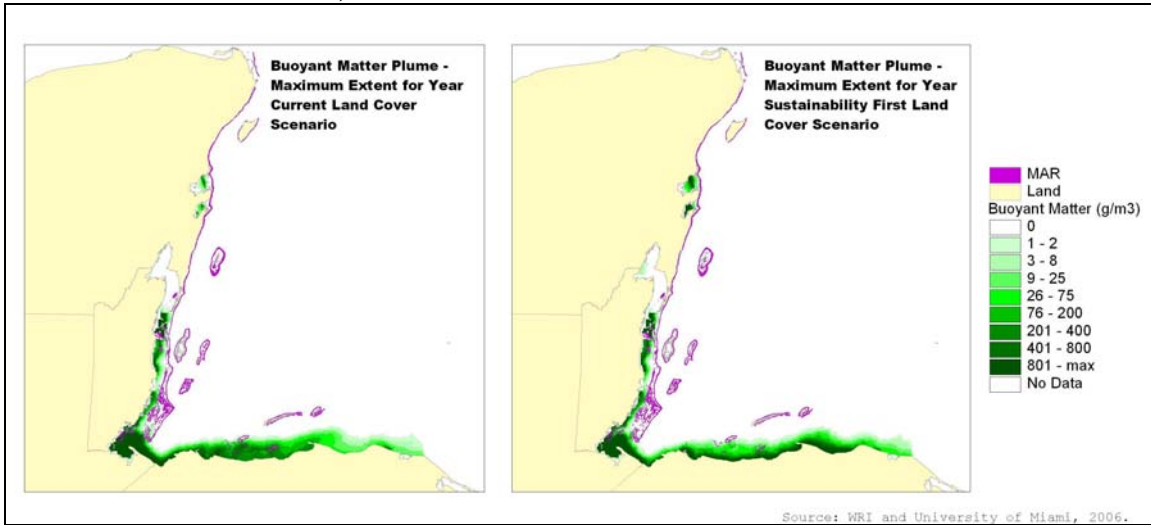
La Figura 11 refleja la pluma simulada de la materia suspendida para el mes de Diciembre en el escenario de cobertura terrestre actual y “sustentabilidad primero”. El modelo ROM predice una pluma de material suspendida menos extensa y menos concentrada para la costa de Honduras durante el mes de Diciembre; al mismo tiempo, el modelo ROMS predice un incremento en la concentración de material suspendida en dos Bahías semi-cerradas en Yucatán: La Bahía de la Ascención, y la Bahía de Espíritu Santo. Gran parte de este cambio se debe a una disminución en la descarga de sedimento en el escenario de sustentabilidad primero. Sin embargo, se observa un incremento en la materia flotante en la Península de Yucatán, el cual se explica por un cambio en el patrón de circulación a lo largo del Arrecife Mesoamericano que el modelo ROMS predice. Tal como el clima presenta variabilidad, la circulación marina también varía. Durante el invierno en el escenario de sustentabilidad primero, el giro rotario normal en contra de las manecillas del reloj al norte de Honduras, es reemplazado por la corriente Caribeña. La corriente fluye en forma directa desde el extremo oriental de Honduras hacia la costa de la península de Yucatán llevando consigo sedimentos desde Honduras.

**Figura 11. Simulación de la Concentración de Materia Suspendida a lo Largo de la Región del Arrecife Mesoamericano para el Mes de Diciembre (Escenarios de Cobertura Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero)**



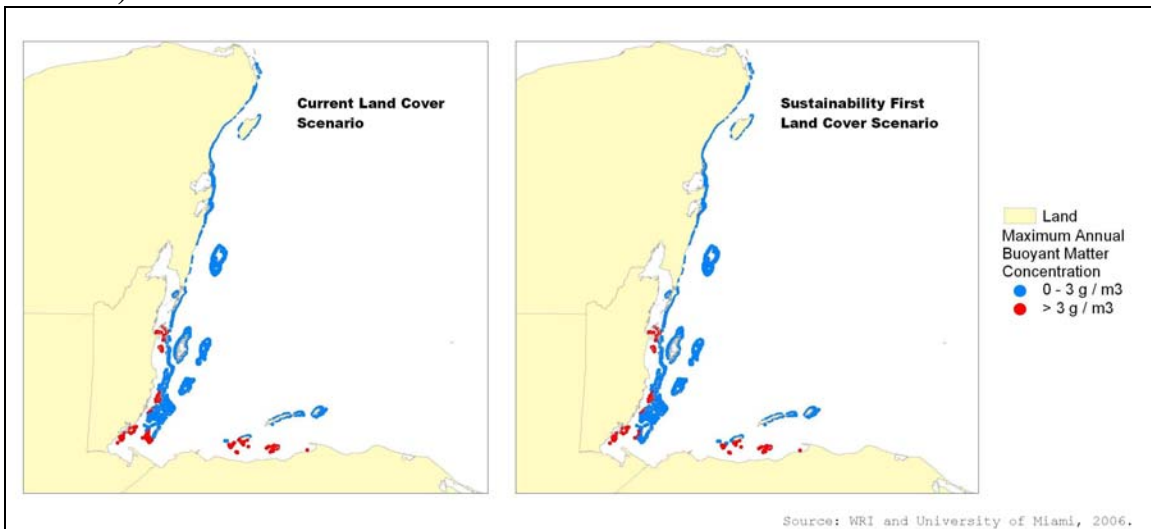
La Figura 12 refleja la extensión y concentración máxima de la pluma de materia suspendida al año para los dos escenarios de cobertura de terreno. La simulación de ROMS indica que en el escenario de sustentabilidad primero, la pluma de la extensión y concentración de materia suspendida se reduce a lo largo de la costa de Honduras, y que materia menos flotante alcanza el arrecife de barrera del sur de Belice. La simulación también predice incrementos en la concentración en bahías semi-cerradas en Yucatán. Estas reducciones en la extensión de la pluma de la material suspendida podrían resultar en cambios en la descarga de sedimento que resultan de cambios en la cobertura terrestre (reducciones en el área de terrenos cultivados), pero también podrían indicar la variabilidad en las simulación del modelo ROMS.

**Figura 12. Concentración Máxima Simulada a lo Largo de la Región del Arrecife Mesoamericano Durante un Año (Escenarios de Cubierte Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero)**



La Figura 13 muestra un mapa de los arrecifes de coral de la región independientemente de que la concentración de material suspendida exceda 3 gramos por metro cúbico (g/m<sup>3</sup>) en cualquier mes del año. Bajo la simulación ROMS para el uso del suelo actual, 12 por ciento de los arrecifes de coral de la región exceden este límite (3 g/m<sup>3</sup>). Por otra parte, en el escenario de sustentabilidad primero, la proporción baja a 10 por ciento. Esto es un indicador del efecto significativo que puede tener un mayor manejo de suelo en la descarga de sedimento y contaminantes al Arrecife Mesoamericano.

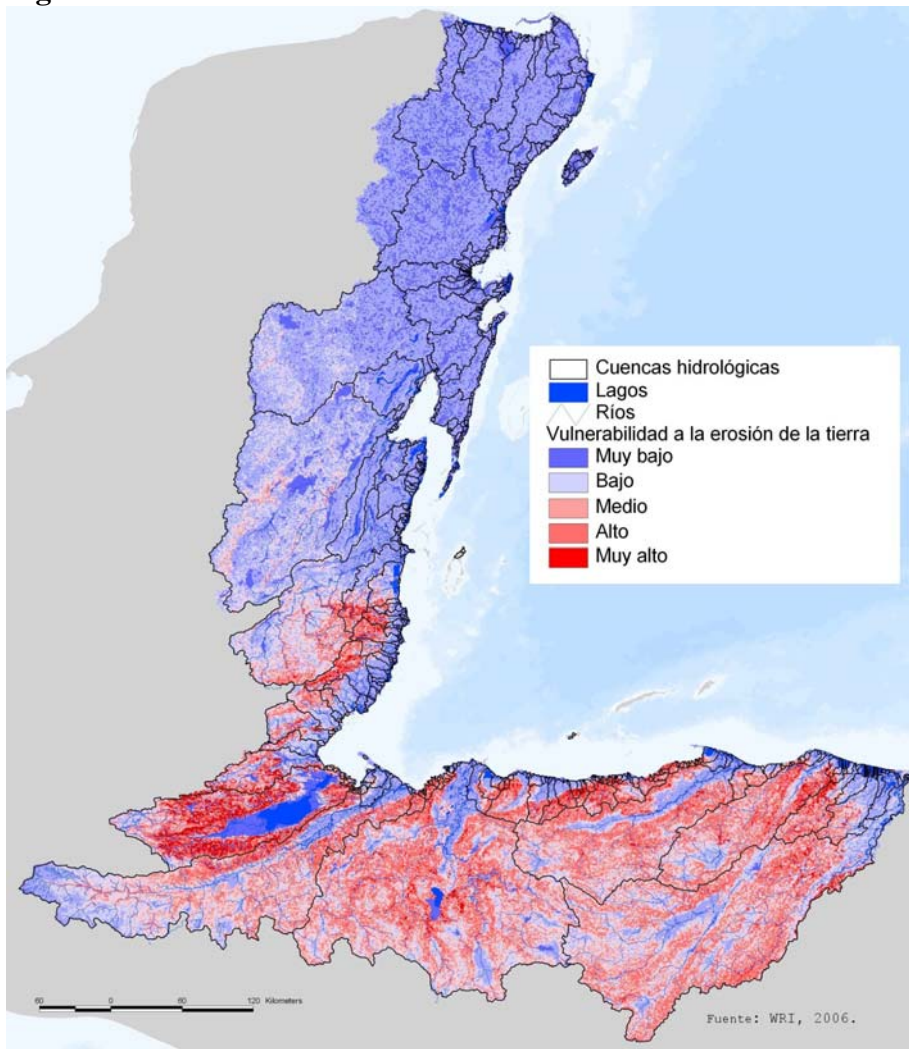
**Figura 13. Mapa de la Concentración de Materia Suspendeda en el Arrecife Mesoamericano (Escenarios de Cobertura Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero)**



## 6) Vulnerabilidad Terrestre a la Erosión

La definición de prioridades para manejo del suelo requiere de información a nivel local sobre las fuentes de sedimento y la vulnerabilidad a la erosión de ciertas áreas. WRI desarrolló un indicador a nivel del paisaje sobre la vulnerabilidad del terreno a la erosión. Incorporando información sobre la pendiente del terreno, erosividad del suelo, y precipitación anual, este indicador estima la vulnerabilidad relativa del terreno a la erosión a una resolución de 1-km. El indicador no incorpora información sobre cobertura de terreno o el uso actual de suelo. Sin embargo, este instrumento indica de forma general las áreas que son susceptibles a la erosión y proporciona una guía sobre dónde se podría restringir el desarrollo, o dónde se debería promover la implementación de mejores practicas de manejo agrícola. La vulnerabilidad es alta en muchas áreas en Guatemala y Honduras así como también en algunas áreas montañosas de Belice (Véase Figura 14).

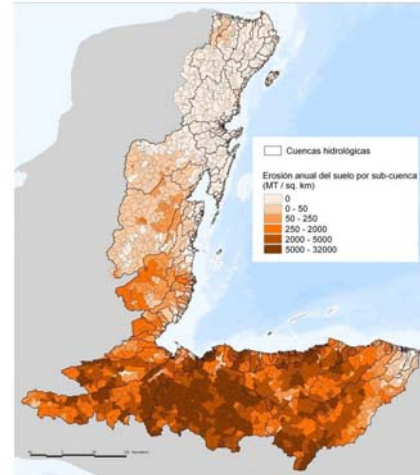
**Figura 14. Vulnerabilidad del Terreno a la Erosión**



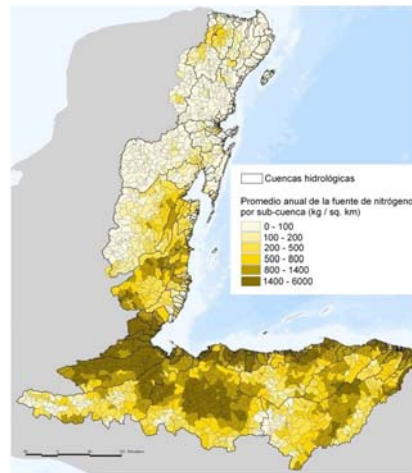
## 7) Fuentes Locales de Sedimento y Nutrientes

El modelo N-SPECT se corrió en el modulo de “efectos locales” para evaluar la cantidad de sedimento erosionado y nutrientes a una resolución de 250 m por celda en la retícula, e independientemente de las celdas adyacentes en la cuadrícula. La evaluación se hizo en base a la cobertura terrestre existente (2003/04). Los resultados fueron sintetizados por sub-cuencas, con el objeto de proveer información para dar prioridad y enfocar mejores prácticas de manejo. Los mapas siguientes muestran el promedio de erosión, descarga de Nitrógeno y Fósforo por celda de la retícula dentro de cada sub-cuenca. Los límites de las cuencas hidrológicas se han incluido para facilitar la referencia y relación de estas fuentes locales dentro de las sub-cuencas de los mapas anteriores de transporte de sedimentos y nutrientes por cuenca.

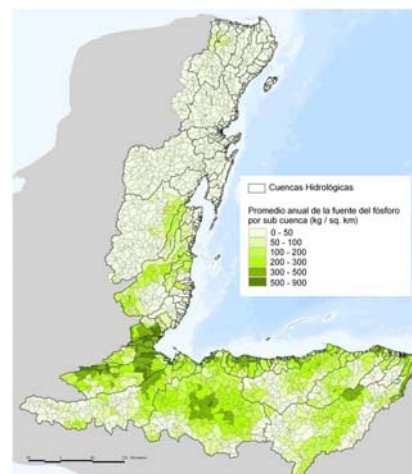
**Figura 15 Contribución Promedio de Sedimento, Nitrógeno y Fósforo a Nivel de Sub-Cuencas**



**Promedio anual de la fuente de nitrógeno por sub cuenca**



**Promedio anual de la fuente de fósforo por sub cuenca**



Fuentes: WRI, 2006.



La información sobre las fuentes locales de sedimento, Nitrógeno y Fósforo también se sintetizó al nivel de país. La mayoría de los sedimentos y nutrientes transportados por las cuencas hidrológicas a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano tienen su origen en Honduras. El modelo indica que más del 80 por ciento del sedimento proviene de Honduras, mientras que el 17 por ciento se origina en Guatemala. Un porcentaje relativamente menor proviene de Belice y México. Honduras también constituye la fuente más grande de nutrientes (55 por ciento de Nitrógeno y 60 por ciento de Fósforo) y Guatemala contribuye con casi un cuarto de todo el Fósforo y Nitrógeno en estas cuencas hidrológicas. Belice contribuye con casi 12-13 por ciento de Fósforo y Nitrógeno mientras que se estima que, de todas las cuencas hidrológicas modeladas, México contribuye con casi cinco por ciento del total de nutrientes.

**Tabla 8. Porcentaje de las Fuentes de Erosión, Nitrógeno y Fósforo por País dentro de la Región del Arrecife Mesoamericano**

País	Erosión (Porcentaje del total)	Nitrógeno (Porcentaje del total)	Fósforo (Porcentaje del Total)
Honduras	83%	55%	60%
Guatemala	17%	26%	25%
Belice	1%	13%	12%
México	0%	6%	4%

Fuente: WRI, 2006

## Conclusión

El análisis presentado en éste documento proporciona un panorama regional de la magnitud y los patrones de descarga de sedimento y nutrientes en las aguas costeras del Arrecife Mesoamericano. Sobre la base de este análisis, se puede concluir lo siguiente:

**Es necesario que las acciones políticas se enfoquen hacia la contribución de los terrenos agrícolas.**

La mayoría del sedimento y nutrientes que son transportados al Arrecife Mesoamericano a través de las cuencas hidrológicas de la región provienen de terrenos agrícolas en Honduras y Guatemala. La contribución de Belice y México es sustancialmente menor aunque todavía constituye una amenaza a lo largo de la costa. Existen muchas iniciativas promisorias para reducir la contaminación en la región. Entre estas iniciativas se encuentra el manejo sustentable de los bosques y el manejo integrado de cuencas en Guatemala; un mejor programa de planificación de uso de suelo, reforestación y conservación de suelos en Honduras; así como iniciativas similares en México y Belice. Es necesario que estos importantes esfuerzos tengan el apoyo del público, reciban reconocimiento e inversiones continuas.

**Los resultados pueden usarse para identificar áreas donde se necesita un mejor manejo agrícola.**

Este análisis identifica áreas vulnerables donde se necesita evitar la conversión hacia usos de suelo que causan erosión, o, donde se necesita implementar prácticas de manejo en áreas que ya han sido transformadas. El análisis también identifica áreas con erosión y descarga de nutrientes significativos donde se deberían implementar mejores prácticas de manejo agrícola.

**Se puede reducir la descarga de sedimento y nutrientes a través de políticas que favorezcan el desarrollo sustentable.**

Como lo demuestran los hallazgos de éste análisis, políticas que favorecen el desarrollo sustentable tales como la planificación del uso del suelo, el manejo integrado de cuencas hidrológicas, y otras, pueden ayudar a disminuir la erosión y descarga de contaminantes reduciendo el sedimento y los nutrientes que alcanzan el Arrecife Mesoamericano.

**Es necesario conducir un modelaje más detallado para crear información más exacta y con mayor resolución.**

Los análisis regionales son útiles y proporcionan un panorama para priorizar áreas donde se necesita actuar inmediatamente; sin embargo, los análisis locales proporcionan la información detallada y exacta que políticos necesitan para encauzar mejor sus intervenciones. Las herramientas que se proporcionan en el CD *Análisis de las Cuencas Hidrológicas del Arrecife Mesoamericano* (Proyecto WRI/ICRAN, 2006) permiten a los usuarios hacer análisis de descarga de sedimento y nutrientes en áreas más pequeñas dentro del Arrecife Mesoamericano, por ejemplo, al nivel de cuenca hidrológica.

En especial, el modelo N-SPECT puede ser aplicado a cuencas hidrológicas individuales, o grupos de cuencas usando la información de elevación a 90 m que se proporciona en el manual de usuario del modelo. Un modelaje más detallado a nivel local incrementará la exactitud de los resultados si se usa información sobre pendiente y cobertura terrestre a una resolución más alta, y si el modelo se calibra de acuerdo a los tipos de suelo y a los regímenes de precipitación local.

Sería de gran valor poder extender el presente análisis para incluir el efecto de mejores prácticas de manejo agrícola sobre la erosión y escorrentía de contaminantes. Esta extensión requeriría información detallada sobre cómo cada una de las mejores prácticas de manejo influye sobre las tasas de erosión y los coeficientes de escorrentía de contaminantes. Una vez esta información esté disponible, debería ser posible utilizar N-SPECT para evaluar reducciones en las descargas al tratar cada intervención de manejo en cada tipo de cobertura del suelo, como una categoría única con características específicas de erosión y escorrentía de contaminantes. Por ejemplo, el cultivo de banano con control mejorado de la erosión, sería tratado como una categoría independiente.

**Se necesita mejorar el modelo para incrementar la exactitud de los valores estimados de las descargas de nutrientes y sedimento.**

Se recomienda que se invierta para mejorar la programación del modelo N-SPECT de manera que se pueda incluir la redistribución y pérdida de nutrientes durante su transporte

en las cuencas hidrológicas. Esta mejora resultaría en una herramienta con mejor capacidad de estimar las descargas actuales de sedimento y nutrientes en desembocadura de los ríos. La exactitud de estas estimaciones podría entonces ser evaluada con mediciones de campo.

**Este tipo de análisis puede ayudar a evaluar el progreso alcanzado en la reducción de la amenaza que representa el sedimento.**

Existen varias iniciativas nacionales, así como iniciativas regionales financiada por varios donantes que buscan reducir ó mitigar las amenazas al Arrecife Mesoamericano. Este análisis puede ayudar a dichas iniciativas a estimar el progreso porque provee la información necesaria para asegurarse que se están moviendo en la dirección correcta.

**Este análisis puede apoyar fuertemente el manejo transnacional de recursos naturales.**

Se necesita una cooperación constructiva y regional entre varias partes interesadas, para mitigar y reducir las amenazas terrestres al Arrecife Mesoamericano. Por ejemplo, acuerdos multilaterales de cooperación entre los cuatro países, acuerdos entre los sectores agrícolas y de turismo y grupos de la sociedad civil. Esta herramienta trabaja sin importar las fronteras y los sectores, y crea información que permite establecer un diálogo productivo sobre el origen de las amenazas y medidas para mitigarlas.

La colaboración con La Red de Acción Internacional para los Arrecifes de Coral (ICRAN) continuará apoyando la aplicación de las herramientas y los resultados de éste análisis en la región. Para más información sobre ICRAN, por favor visite: [www.icranmar.org](http://www.icranmar.org).

Por favor dirija sus preguntas o comentarios sobre este análisis a:

**Lauretta Burke ([lauretta@wri.org](mailto:lauretta@wri.org)) and Zachary Sugg ([zsugg@wri.org](mailto:zsugg@wri.org))**

**World Resources Institute,**

**10 G St. NE,**

**Washington, DC 20002,**

**+1 (202) 729-7600**

**Sitio de Internet: [reefsatrisk.wri.org](http://reefsatrisk.wri.org)**

## Notas Técnicas Adicionales

- 1) **Delineación de las Cuencas Hidrológicas** – Las cuencas hidrológicas fueron delineadas a una resolución de 250 m en WRI usando N-SPECT y ArcMap. Fue necesario hacer la delineación en N-SPECT para hacer compatibles los resultados con el DEM. Esta compatibilidad permite detectar la localidad de los ríos (donde se acumulan las descargas) y los límites de las cuencas hidrológicas. Sin embargo, el modelo N-SPECT agrupa las cuencas hidrológicas costeras, lo que hace difícil examinar las descargas específicas en los ríos y el transporte de sedimento. Para resolver esto, se extrajo información sobre la dirección de la descarga del modelo N-SPECT; esta información se convirtió en la base para derivar información más detallada sobre las cuencas hidrológicas en ArcMap (utilizando el comando BASINS en ArcTools\Spatial Analyst). En ArcMap se hizo un análisis de Acumulación de Descargas para identificar los ríos y arroyos afectados. La información sobre acumulación de descargas fue combinada con las cuencas hidrológicas para identificar los puntos donde las descargas son más intensas en cada cuenca. Este punto fue designado “punto de descarga”, o desembocadura del río.
- 2) **Largo de la Pendiente en N-SPECT.** Se hicieron dos delineaciones de cuencas hidrológicas en el modelo N-SPECT. La primera delineación se basó usando información hidrológica corregida del DEM (la corrección del DEM incluye pendientes artificiales a lo largo de los ríos (“*burned*”) y el resultado fue una buena delineación de cuencas hidrológicas. La segunda delineación se hizo usando información “cruda” del DEM. Aunque el segundo proceso resultó en una delineación de cuencas hidrológicas menos exacta, fue posible obtener cálculos más correctos sobre pendientes y la longitud de las mismas (llamadas Lsgrid en N-SPECT). La información más detallada sobre pendientes y su longitud se copió en la capa de GIS con la delineación correcta de las cuencas hidrológicas del primer proceso. Todos los análisis subsiguientes se hicieron usando la información combinada.
- 3) **Factor R** – La ecuación utilizada para calcular el Factor-R fue la siguiente:

$$R=3786.6 + 1.5679 * (\text{Precipitación en mm}) - 1.9809 * (\text{Elevación en m})$$

Donde:

R esta representada en unidades métricas (MJ \* mm \* ha-1 \* h-1 \* y-1) ó (megajoules \* mm por hectárea por año). Sin embargo, el modelo N-SPECT require unidades en el sistema inglés (cientos de pies \* toneladas de fuerza \* pulgadas \* acres-1 \* hora-1 \* año-1). Las unidades del sistema métrico decimal fueron convertidas al sistema métrico inglés dividiéndolas entre 17.02.

Referencia: USDA-ARS Manual de Agricultura No. 703.