

Murcia, Carolina; Muñoz-Carpena, Rafael; Sasa, Mahmood  
Modelaje integrado de cambio climático y socioeconómico en el manejo sostenible del  
recurso hídrico en la cuenca Arenal-Tempisque: Una propuesta multidisciplinaria  
Revista de Ciencias Ambientales, vol. 43, núm. 1, enero-junio, 2012, pp. 47-62

Universidad Nacional  
Heredia, Costa Rica

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=665070685005>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org



# Revista de CIENCIAS AMBIENTALES

## Tropical Journal of Environmental Sciences



**Modelaje integrado de cambio climático y socioeconómico en el manejo sostenible del recurso hídrico en la cuenca Arenal-Tempisque: Una propuesta multidisciplinaria**

***Integrated Climate Change and Socio-economic Modeling in the Sustainable Management of Water Resources in the Arenal-Tempisque Basin: A Multidisciplinary Approach***

**Carolina Murcia <sup>a</sup>, Rafael Muñoz-Carpena <sup>b</sup> y Mahmood Sasa <sup>c</sup>**

<sup>a</sup> C. Murcia, ecóloga tropical especialista en sistemas boscosos de montaña, es directora científica de la Organización para Estudios Tropicales, Costa Rica. <sup>b</sup> R. Muñoz-Carpena, ingeniero especializado en modelaje de sistemas ambientales, es profesor en la Universidad de Florida e investigador del Instituto del Agua de esa institución, Estados Unidos. <sup>c</sup> M. Sasa, herpetólogo, es investigador y docente en el Instituto Clodomiro Picado de la Universidad de Costa Rica y director de la Estación Biológica Palo Verde de la OET, Costa Rica.

**Director y Editor:**

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

**Consejo Editorial:**

Enrique Lahmann, IUCN , Suiza

Enrique Leff, UNAM, México

Marielos Alfaro, Universidad Nacional, Costa Rica

Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica

Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica

Gerardo Budowski, Universidad para la Paz, Costa Rica

**Asistente:**

Rebeca Bolaños-Cerdas

# Modelaje integrado de cambio climático y socioeconómico en el manejo sostenible del recurso hídrico en la cuenca Arenal-Tempisque: Una propuesta multidisciplinaria

**Carolina Murcia, Rafael Muñoz-Carpena y Mahmood Sasa**

C. Murcia, ecóloga tropical especialista en sistemas boscosos de montaña, es directora científica de la Organización para Estudios Tropicales. R. Muñoz-Carpena, ingeniero especializado en modelaje de sistemas ambientales, es profesor en la Universidad de Florida e investigador del Instituto del Agua de esa institución. M. Sasa, herpetólogo, es investigador y docente en el Instituto Clodomiro Picado de la Universidad de Costa Rica y director de la Estación Biológica Palo Verde de la OET.

## Resumen

El manejo actual del recurso hídrico en la cuenca del Tempisque es insostenible y se predice que empeorará dadas las proyecciones de aumento de temperatura y condiciones de sequía en el futuro cercano. Describimos aquí los planes para realizar un análisis cuantitativo del suministro y la demanda del recurso hídrico en esta cuenca y explorar, a partir de datos empíricos y de la integración de información de distintos usuarios, cómo el cambio climático podría afectar los servicios ecosistémicos en términos de disponibilidad de agua, uso del suelo y biodiversidad. De esta manera, el proyecto intenta modelar esta información para investigar cuáles acciones deben acometerse para ayudar a mantener o mejorar el suministro de agua y los servicios ecosistémicos en el futuro.

## Abstract

Current water use in the Tempisque River Basin is unsustainable and will become worse as global and regional climate models forecast a warmer and dryer future. This generates management challenges in both natural and human systems, already strained beyond their limit of economic and biological sustainability. Here, we describe a proposed study to conduct an in depth quantitative analysis of the sustainability of water supply and demand in this basin, and to explore through empirical data and stakeholder input integration and model based scenarios analysis, how climate change may affect ecosystem services through changes in water availability, land use and biodiversity. We think that this approach can provide insights to what actions may be taken, from policy to practice to help maintain or improve water availability and ecosystem services in future years.

“El paisaje, su evolución y su función como fundamento para la vida y las actividades humanas, aunque intrincado y complejo, es cada vez más comprensible e incluso predecible mientras más trabajamos en las barreras intelectuales que han fragmentado la investigación sobre el paisaje en el pasado”. Con estas palabras, el Consejo Nacional de Investigación de EU (National Research Council, 2009) sintetiza la importancia de abordajes multidisciplinarios en estudios sobre ambientes complejos en escalas geográficas amplias.

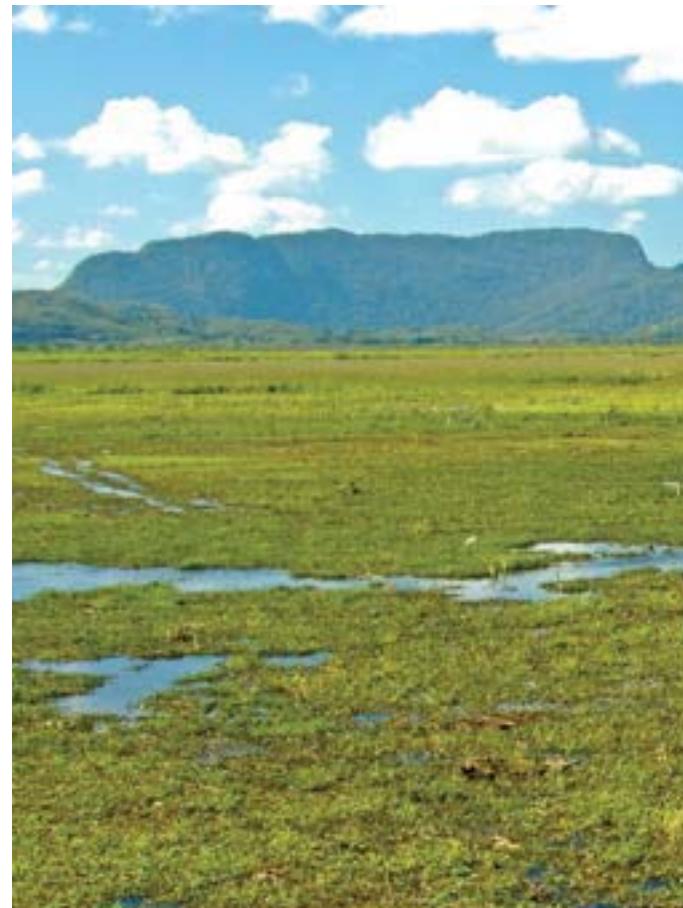
Este trabajo resume una propuesta multidisciplinaria que pretende examinar la interacción de ambientes terrestres y acuáticos -y su manejo- en el contexto del cambio climático, a partir de diferentes perspectivas en ecología, hidrología, climatología, economía, derecho ambiental y sociología rural. Nuestro sistema de enfoque es la gran cuenca del río Tempisque (GCRT) en el noroeste de Costa Rica y pretendemos emplear modelaje moderno para integrar estas perspectivas, identificar vacíos en el conocimiento y formular hipótesis evaluables que nos permitan desarrollar predicciones de cómo será el escenario natural y

**Palabras claves:** modelaje ambiental, cambio climático, cambio global, Tempisque.

**Key words:** environmental modeling, climate change, global change, Tempisque.

humano en el futuro cercano en la región. Estas predicciones permitirían a su vez formular mejores políticas para afrontar los efectos de variabilidad y cambio climático en la cuenca y establecer manejo sostenible del recurso hídrico en ella.

A finales de abril de 2012, un grupo de investigadores asociados a esta propuesta se reunieron en la Estación Biológica Palo Verde, de la Organización para Estudios Tropicales (OET), para integrar las primeras bases de datos y discutir sobre los alcances y próximas direcciones del proyecto.



Conforme el proyecto se desarrolle, es de esperar la incorporación de nuevos campos y nuevos equipos de trabajo, algunos no identificados aún, razón por la que pensamos pertinente mostrar esta propuesta en un foro como la revista *Ambientales*. Así, debido a su magnitud y a la relevancia que el tema supone para los lectores de esta revista, creemos conveniente ventilar aquí este esfuerzo y extender una invitación a aquellos grupos interesados en afrontar el reto que supone semejante plan.

## Antecedentes

La gran cuenca del río Tempisque se extiende desde la cordillera de Guanacaste hasta el golfo de Nicoya (figura 1), abarcando cerca de 5 404 km<sup>2</sup>. Incluye el río Tempisque y sus principales tributarios: Bebedero, Cañas y Liberia, que fluyen hacia el mencionado golfo. El extremo sur de la cuenca está constituido por humedales a lo largo de la vera del Tempisque, incluyendo los protegidos por el Parque Nacional Palo Verde. Estos humedales son reconocidos internacionalmente



Laguna Palo Verde, Juan José Pucci

a través de la Convención Internacional para los Humedales Ramsar (1971, <http://ramsar.org>).

A mediados de los años setenta un cambio fundamental ocurrió en el entorno de la cuenca baja y media del Tempisque cuando el Gobierno, con fondos del Banco Interamericano de Desarrollo, generó un esfuerzo para proveer tierra y opciones de agricultura a ciudadanos de escasos recursos asociados con el sector agrícola. Esta iniciativa transfiere 30-65 m<sup>3</sup>/s de agua del lago Arenal a través de canales hasta un distrito de irrigación y permite el desarrollo de la agricultura en una región que otrora fue primordialmente pecuaria (Jimenez y González, 2001). A partir de ese momento, la cuenca natural del Tempisque incluye la influencia del embalse Arenal, razón por la que se le conoce también como cuenca Arenal-Tempisque.

A pesar de su intención original, el proyecto de irrigación beneficia principalmente a los grandes productores de caña, arroz y acuacultura (principalmente tilapia) de la región. Los canales de irrigación brindan un volumen considerable de agua a la cuenca, pero impactan algunos de los humedales preexistentes en la parte baja de ella (Daniels y Cumming, 2008). Además, el desarrollo de terrenos para la agricultura intensiva derivados del distrito de riego ha afectado también otros humedales que se extendían en la zona en el pasado.

Debido a su ubicación en el corazón de la cuenca baja, el humedal Palo Verde ha sufrido severas modificaciones, principalmente manifiestas en la invasión de la enea *Typha domingensis* desde mediados de la década de los ochenta. Se cree que esta invasión responde a modificaciones del hidroperiodo y exceso de carga de nutrientes de la agricultura en las zonas más altas, y tiene como consecuencia la concomitante pérdida de especies asociadas a humedales, especialmente aves acuáticas. La porción baja integra entonces tanto lo bueno como lo malo de las prácticas de uso a lo

largo de toda la cuenca (Pringle, 2001), por lo que los humedales en la cuenca baja se han convertido en el filtro *de facto* de todos los efectos del manejo de agua y uso del suelo corriente arriba.

Si bien es claro que la situación actual del manejo de agua en la GCRT no está exenta de problemas, estas condiciones posiblemente sean exacerbadas por la variación y cambio climático previstos para esta región, que apuntan a condiciones más secas y cálidas (ver próxima sección). Los productores agrícolas y pecuarios, así como distintas agencias del Gobierno, están conscientes de las predicciones climáticas y se está trabajando actualmente en estrategias para adaptarse a ellas. Por ejemplo, muchos de los productores intentan reemplazar el arroz con caña de azúcar y piña, que requieren menos agua en su producción. Por otro lado, el Servicio Nacional de Riego y Avenamiento (Senara) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (Mag) estudian planes para construir más canales de irrigación y embalses, para responder a la creciente demanda de la agricultura y los desarrollos turísticos en la región (República de Costa Rica, 2010). Estas iniciativas están diseñadas para atender retos individuales, pero no se ha adoptado aún una visión integral de todos los asuntos. De no abordarse el problema de forma sistémica, las acciones individuales podrían resultar inefectivas y producir consecuencias no deseadas e irreversibles. Por ejemplo, el plan del Gobierno de proveer más agua para proyectos de irrigación podría desalentar a los productores a adoptar cultivos menos demandantes de agua.

## Inminente cambio en condiciones climáticas regionales

El reporte del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático del 2007 (IPCC) indica

**Figura 1.** Cuenca Arenal-Tempisque, indicando las porciones alta, baja y media, y distrito de riego de Senara.



una congruencia de modelos predictivos globales que apunta a un incremento de las temperaturas y a un decrecimiento de la precipitación en la costa pacífica de Centroamérica (Magrin, García, Cruz Choque, Giménez, Moreno, Nagy, Nobre y Villamizar, 2007). Los modelos más específicos (regionales o locales) de cambio climático también concuerdan con ello, pero señalan temperaturas aun mayores y una más marcada deficiencia de agua para la misma región (Anderson, Flores, Pérez, Carrillo y Sempris, 2008). A menos de que el patrón de emisiones de gases de invernadero cambie -lo que no pareciera factible en el futuro inmediato- se espera que la temperatura media en la costa pacífica de Centroamérica se incremente de 2 a 6 °C, posiblemente con un aumento de eventos extremos hidroclimáticos. La precipitación durante la estación lluviosa se espera que decaiga tanto como 27%, con déficit de humedad asociada en suelos y pérdidas de agua almacenada para irrigación, producción hidroeléctrica y humedales. Los flujos del río durante la estación seca también se espera que decaigan debido al decrecimiento de cobertura de nubes en las montañas (Karmalkar, Bradley y Díaz, 2008). Estos cambios podrían desencadenarse en corto tiempo: en tan solo dos décadas ya podrían ser notables algunos de sus efectos si se mantiene la tendencia a incrementar la aridez que actualmente es evidente en el noroeste de Costa Rica (Birkel y Demuth, 2006). Los patrones climáticos a escala regional parecen ser consistentes con los escenarios a más largo plazo y a nivel global. Por ello, se predice severos impactos en la agricultura, la biodiversidad y el uso de la tierra a nivel regional (Poveda, Waylen y Pulwarty, 2006; Waylen, Quesada, Caviedes, 1996a; Waylen, Caviedes y Quesada, 1996b).

da para irrigación, producción hidroeléctrica y humedales. Los flujos del río durante la estación seca también se espera que decaigan debido al decrecimiento de cobertura de nubes en las montañas (Karmalkar, Bradley y Díaz, 2008). Estos cambios podrían desencadenarse en corto tiempo: en tan solo dos décadas ya podrían ser notables algunos de sus efectos si se mantiene la tendencia a incrementar la aridez que actualmente es evidente en el noroeste de Costa Rica (Birkel y Demuth, 2006). Los patrones climáticos a escala regional parecen ser consistentes con los escenarios a más largo plazo y a nivel global. Por ello, se predice severos impactos en la agricultura, la biodiversidad y el uso de la tierra a nivel regional (Poveda, Waylen y Pulwarty, 2006; Waylen, Quesada, Caviedes, 1996a; Waylen, Caviedes y Quesada, 1996b).

## Idoneidad de la cuenca del Tempisque

La cuenca del Tempisque es un sitio adecuado para el estudio de la sostenibilidad en el manejo de agua y las interacciones climáticas con extensas aplicaciones a otras regiones, especialmente en el Pacífico mesoamericano. Esta cuenca es similar en condiciones y atributos físico-biológicos a otras cuencas hidrográficas de la región: la porción superior es más húmeda y suele disponer de ambientes con mayor precipitación, mientras que las porciones media y baja experimentan mayor estacionalidad en el patrón de lluvias y en ellas se desarrolla vegetación asociada al bosque seco estacional. Como para toda la región pacífica, se

prevé que experimente un clima más seco y caliente en el futuro cercano.

A pesar de estas similitudes, la cuenca del Tempisque presenta características que la hacen un lugar ideal para realizar un estudio de esta envergadura. En primer lugar, contiene varias instituciones con influencia en el manejo de los recursos naturales, incluyendo el hídrico. Entre esas instituciones se incluyen sedes de tres universidades estatales (UCR, Una y UTN), un sistema de áreas protegidas que incluyen ambientes terrestres y acuáticos centrados en un Parque Nacional (Palo Verde), la existencia de la Estación Biológica del consorcio de la OET, que lidera investigaciones en humedales, y varias agencias estatales y organizaciones no gubernamentales que intervienen en el manejo de tierras y aguas en la región (por ejemplo, miembros del Cidecat -ver artículo al respecto en este mismo volumen-), o que son responsables de generar la mayoría de la información pertinente para este estudio.

Además del apoyo de estas instituciones nacionales, esta propuesta cuenta con el aval de tres instituciones internacionales que en conjunto participan en la coordinación de los esfuerzos: la OET, que es un consorcio de 60 universidades de EU, Costa Rica y otros países con más de 49 años de presencia en Costa Rica y en la región; el Instituto del Agua de la Universidad de Florida, que brinda docentes e investigadores de varios de sus departamentos con fuertes nexos anteriores en Costa Rica, y el Centro de Cuencas de Río de la Universidad de Georgia, designado por la Agencia de Protección Ambiental de EU como el primer centro para la excelencia de cuencas y que ha participado en varios proyectos con instituciones nacionales en el Tempisque.

## Objetivos del proyecto

El objetivo de nuestro proyecto es, mediante un análisis interdisciplinario profundo de la

GCRP, entender y predecir cómo los usos del suelo y el manejo del agua -actuales y futuros- podrían interactuar en distintos escenarios de cambio climático y cuáles podrían ser algunos efectos en la salud de la GCRP, en sus habitantes y en su biodiversidad. La investigación relevante que ha precedido esta iniciativa provee una línea base muy buena para una exploración inicial, que sería complementada con investigación en el campo durante la segunda fase de este proyecto. Este trabajo tiene el potencial de generar un plan de manejo basado en conocimiento científico para la totalidad de la cuenca de modo que se pueda maximizar los beneficios para todas las partes involucradas y minimizar el impacto del cambio climático y de las estrategias de adaptación para la GCRP y, por extrapolación, para otras cuencas de Mesoamérica.

El objetivo a largo plazo de esta iniciativa (a completarse en 5-10 años) es entender las causas y consecuencias del uso de agua en la cuenca seleccionada y -sobre esa información- predecir cómo el uso del agua cambiará conforme la temperatura aumente, la precipitación disminuya y el uso de la tierra se modifique. Además, se pretende determinar cuáles medidas de gobernanza serán adoptadas para asegurar la sostenibilidad regional del suministro hídrico mientras se protegen sitios de importancia ecológica internacional. Este objetivo está mejor expresado en tres componentes: (1) desarrollar un análisis cuantitativo detallado de la función y servicios ecosistémicos que brinda el actual uso del agua en la cuenca; (2) usar esta cuenca como un sitio representativo del Pacífico mesoamericano para explorar, a través de modelos basados en análisis de escenarios y de datos empíricos, cómo cambios climáticos podrían afectar los servicios que provee el ecosistema a través de cambios en la disponibilidad de aguas, el uso de la tierra y la biodiversidad, e (3) investigar cuáles acciones pueden ser emprendidas -desde políticas a prácticas- para ayudar al mantenimiento o mejoramiento de la disponibilidad

de agua y servicios del ecosistema en el futuro. Aquí usamos el concepto de función del ecosistema y servicios en sentido amplio, incluyendo sostenibilidad en biodiversidad, calidad y suministro de agua, flujos del ecosistema, salud humana y animal, viabilidad agrícola y mayor empleo de fuentes renovables de energía, entre otros muchos componentes. Intentaremos de esta manera extender las lecciones y experiencias que podemos generar en este proyecto a lo largo de otras cuencas de Mesoamérica, a través de una red de organizaciones no gubernamentales, oficinas de apoyo como USAID y ministerios de ambiente en los países de la región, siguiendo el acuerdo de cooperación regional de Tuxtla (Tuxtla, 2009).

Los objetivos a corto plazo se enfocan en la planificación de la iniciativa. Para ello se pretende: (1) colectar e integrar información disponible, incluyendo literatura gris, a través de barreras interinstitucionales e identificar vacíos de conocimiento a partir de resultados de talleres de expertos que aborden distintos ejes del proyecto; (2) desarrollar modelos conceptuales preliminares que integren las varias disciplinas y que estén disponibles para el desarrollo de preguntas de investigación y pruebas de hipótesis sobre el uso del agua, su sostenibilidad y el efecto del clima en la región, y (3) consolidar un equipo para desarrollar propuestas específicas para la obtención de fondos que permitan alcanzar los objetivos a largo plazo.

## **Visión integral para el manejo sostenible de la cuenca del Tempisque**

La situación actual del Tempisque merece un abordaje multidisciplinario que integre diferentes perspectivas para entender la compleja dinámica del manejo hídrico. Desde el marco legal que controla las acciones de manejo de recursos en la cuenca, hasta las interacciones ecológicas

en el humedal perturbado de Palo Verde, muchos factores se interrelacionan y afectan de muy complicadas maneras. El hilo común que conecta estos componentes es la disponibilidad de agua y su manejo, desde las fuentes naturales (nacientes del Tempisque y el Bebedero) y antropogénicas (embalse Arenal) hasta sus puntos de descarga en el golfo de Nicoya, después de pasar por diferentes usos del suelo y sistemas naturales. Nosotros visualizamos un proyecto que logre incorporar análisis legal, económico, social, geográfico, hidrológico y ecológico y que integre los componentes humanos y físicos. Pretendemos emplear un abordaje de ingeniería de sistemas para su modelaje, entendiendo y prediciendo las entradas actuales, sus salidas y cambios potenciales derivados de ciclos de retroalimentación y su potencial cambio bajo escenarios de cambio climático. Una visión sostenible integrada para el sistema del Tempisque debe incluir su sostenibilidad biogeofísica, esto es, si los recursos son suficientes o no para asegurar su uso en el tiempo. Además, debe contener análisis de sostenibilidad económica (¿es rentable el sistema?) y sostenibilidad social (¿es aceptable socialmente y equitativo?). La siguiente sección indica cómo cada componente contribuiría con esta visión integrada.

### **Sostenibilidad biogeofísica**

#### *Factores climáticos*

Poveda et al. (2006) presentan un análisis climático del noroeste de Sudamérica y de Centroamérica ístmica basado en los factores más importantes que operan a escalas intra-estacionales e inter-décadas, a partir de datos de estaciones meteorológicas e información de satélites. En esta región, la principal variable hidroclimatológica es la precipitación, que varía considerablemente en diferentes escalas. El principal control para esa variable es la migración meridional de la zona de convergencia inter-tropical y sus patrones de vientos asociados. La oscilación sur de El Niño es

la principal causa de variación interanual en la precipitación media de la región. El Niño es un fenómeno cíclico con una periodicidad general de 3-7 años. En mucho del Pacífico mesoamericano, El Niño provoca una sequía prolongada, generalmente durante la segunda mitad de la estación lluviosa. La fase fría de este fenómeno, conocido como La Niña, provoca un efecto contrario: lluvia excesiva. Al parecer, El Niño es un sistema no lineal, con dos o tres nodos sobre los que opera. En general, hay un patrón coherente de anomalías climáticas e hidrológicas sobre la región durante las fases extremas de El Niño (Waylen et al., 1996a, 1996b): las anomalías negativas (reducción de lluvia, humedad del suelo y ríos) así como las temperaturas más altas ocurren de julio a agosto, a partir de períodos de veranillo en los años de El Niño. Lo opuesto sucede durante la fase fría de La Niña, aunque hay diferencias en tiempo y extensión del efecto.

Los procesos climáticos regulan el suministro de entradas ambientales (temperatura, precipitación, caudal, etc.) esenciales para los servicios ambientales y la producción agrícola e industrial. El cambio climático puede interrumpir esta cadena de suministros. Así, el componente climatológico de este proyecto pretende analizar mejor las tendencias en la disponibilidad de precipitaciones y caudales a nivel local. Por ejemplo, ¿a qué grado las cuencas Arenal y Tempisque experimentarán los mismos efectos ante el fenómeno de El Niño? Técnicamente, Arenal es parte de la vertiente Caribe que generalmente muestra un régimen pluvial y respuesta a El Niño opuestas a las experimentadas en la vertiente pacífica (Waylen y Laporte, 1999; Quesada y Waylen, 2004). Teóricamente, entonces, las pérdidas sufridas en el Tempisque podrían ser compensadas por aumentos en el Arenal, pero ideas como esta deberán ser probadas. Otras interrogantes asociadas a este componente son: (1) ¿cuáles son las interrupciones de la cadena de suministros asociadas con

varios grados de cambio climático?, (2) ¿cuáles acciones regulatorias mitigan el cambio climático?, (3) ¿pueden las actividades productivas adaptarse al cambio climático?, (4) ¿cómo pueden desarrollarse actividades productivas de manera sostenible con la provisión de servicios ambientales? Los intentos de contestar estas interrogantes deben reconocer las interacciones entre los factores biofísicos y humanos contribuyentes.

#### *Factores hidrológicos*

La gran dependencia por parte de la hidrología del Tempisque de la variabilidad climática es exacerbada por las intervenciones humanas. Las dos regiones superiores de la cuenca poseen un efecto regulador sobre la porción baja, donde se ubica el Parque Nacional Palo Verde (figura 1). La cuenca media es afectada directamente por la transferencia de agua desde el embalse Arenal, que pertenece a una cuenca natural distinta a la del Tempisque. Las plantas generadoras de energía hidroeléctrica en el Arenal son controladas por el Instituto Costarricense de Electricidad (Ice), que tiene como mandato mantener un flujo mínimo de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  para suplir al distrito de irrigación, combinado con un flujo variable que resulta de la generación hidroeléctrica.

Las plantas eléctricas del Proyecto Arenal son parte de una red de producción que se activa en respuesta a la disminución de generación debida a períodos de sequía en otras plantas del país. Los regresos de irrigación alimentan el Tempisque en diferentes puntos de la cuenca baja, lo que influye en los flujos y cargas de nutrientes y polutos en el río. Como resultado, el patrón del flujo en el Tempisque es a veces difícil de predecir. El gran proyecto de irrigación en la sección media de la cuenca es manejado por Senara, que administra la distribución de agua a los productores agrícolas. Sin embargo, esta institución no tiene control sobre el uso del agua o los excedentes de granjas individuales. Además, un importante ele-

mento ausente de los planes de manejo de agua es el uso del agua subterránea en las cuencas bajas y altas (Ballesteros, Reyes y Astorga, 2007).

#### Factores agroecológicos

En las siguientes décadas, el incremento de temperatura y la disminución de precipitación muy probablemente tengan consecuencias tanto en sistemas naturales como en los agrícolas, así como en la salud humana y animal. El decrecimiento de flujos en las nacientes del sistema durante la época seca podría forzar a quebradas otrora permanentes a convertirse en intermitentes, con el consecuente declive de la diversidad acuática (Karmalkar, Bradley y Díaz, 2008). Las pozas y charcas aisladas en estas “nuevas” quebradas intermitentes, carentes de peces depredadores, podrían producir mayor biomasa de mosquitos, especialmente de los que son vectores de importantes patógenos, como es el caso de mosquitos de los géneros *Culex* y *Anopheles*.



Izquierda: Mono cara blanca. Derecha: Palo Verde (época seca). Erick Gay



Actualmente, el flujo de nutrientes desde los residuos de actividades agrícolas y granjas acuícolas en la cuenca media parece mediar en la proliferación de la tifa, lo que a su vez reduce el espejo de agua necesario para aves vadeadoras y otros organismos acuáticos. Como consecuencia, las poblaciones de aves que utilizan estos humedales protegidos tienden a declinar (Trama, 2004, 2005; Osland, González y Richardson, 2010). Adicionalmente, la tifa acumula biomasa que es muy inflamable cuando seca, lo que contribuye a los grandes incendios que destruyen miles de hectáreas anualmente en el Parque Palo Verde y que afectan la vida silvestre asociada a él. El aumento de aridez en la región empeoraría los efectos de incendios forestales tanto en el Parque como en sus alrededores.

Los rendimientos de cultivos agrícolas, especialmente arroz, podrían verse afectados por los cambios climáticos esperados. Es probable que una alternativa a esta situación sea el dre-

naje de los campos y la sustitución con productos menos demandantes de agua, como caña de azúcar, piña o pastizales para ganado de engorde. Dado que los campos de arroz proveen importantes alternativas de forrajeo para aves acuáticas, especialmente vadeadoras, y que son empleados como sitios reproductivos de los anfibios que pueblan los bosques aledaños, su sustitución por otros

cultivos podría repercutir en disminución de biodiversidad. Otra alternativa para atenuar los efectos de menor productividad del arroz sería la apertura de mayores áreas irrigadas, como un intento por compensar por las menores ganancias. En la cuenca del Tempisque esta apertura significaría una conversión de pastizales y cañaverales en arrozales. Estos cambios entre parcelas de uso intensivo o conservador de agua serían fuertemente influenciados por las políticas gubernamentales en la expansión de los sistemas de irrigación.

Mientras el agua se torne más escasa y más cara, los productores incorporarán políticas de conservación de agua a sus prácticas agrícolas. Aunque la conservación de agua es generalmente beneficiosa bajo condiciones de sequía, debe haber circunstancias donde efectos negativos podrían generarse. Retener agua en campos de cultivo de arroz, reduciendo las salidas, podría resultar en una acumulación de pesticidas y nutrientes que podrían afectar la fauna acuática que habita los arrozales. Durante eventos de lluvia extensos estos polutos podrían ser liberados como pulsos concentrados hacia los humedales naturales, ríos y estuarios.

Análisis ecohidrológicos para esta región ya están en marcha (Moellendorf y Crisman, 2010a, 2010b, 2010c), e indican una interacción significativa entre los canales de riego y los arroyos intermitentes y perennes, así como con bosques adyacentes, dependiendo de la naturaleza de los canales. Estas interacciones afectan la productividad en quebradas y ríos, la diversidad de macro-invertebrados y peces, así como la productividad primaria y la descarga de la hojarasca de los bosques ciliares en las riberas. Cuando se comparan con los arroyos naturales, las redes de canales imitan algunos (pero no todos) los parámetros predichos por la teoría de río continuo (Vannote, Minshall, Cummin, Sedell y Cushing, 1980), que indica que las comunidades bióticas río abajo ca-

pitalizan las ineficiencias de procesamiento de las comunidades que habitan secciones superiores del río, de modo que las estrategias de procesamiento a lo largo del río han sido seleccionadas para minimizar la pérdida de energía.

Los análisis geográficos y el modelaje de sistemas son herramientas poderosas para comprender los procesos socio-ecológicos a nivel del paisaje, por lo que el componente geográfico de este proyecto investigará cómo los planes agrícolas podrían alterar los patrones de uso de la tierra y la conectividad de ambientes naturales (fragmentos de bosque o humedales). Ese componente también analizará cómo cambios en usos agrícolas podrían afectar procesos (por ejemplo, movimientos de especies, nutrientes y/o energía), y cómo éstos podrían afectar procesos ecológicos dentro de las áreas protegidas en la cuenca.

Para sintetizar los datos espaciales existentes pretendemos evaluar el cambio de cobertura y vincularlo con los modelos de interacción humana y el medio ambiente (Lele, Nagendra y Southworth, 2010; Stickler y Southworth, 2008; Daniels, Painter y Southworth, 2008), utilizando la teleobservación por satélite, una metodología que actualmente está bien validada (Cassidy, Binford, Southworth y Barnes, en prensa; Lele et al., 2010; Mondal y Southworth, 2009; Gibbes, Southworth y Keys, 2009; Southworth, Cumming, Marsik y Binford, 2006). Para el sitio de estudio en la cuenca del Tempisque múltiples imágenes en una variedad de escalas están disponibles para determinar cambios en la cobertura desde principios de 1980 hasta el presente; entre ellas: Quickbird, Ikonos y fotografías aéreas, Landsat MSS, TM, ETM y ASTER e imágenes a gran escala AVHRR y MODIS.

## Sostenibilidad socioeconómica

### Factores sociales

Los cambios hidrológicos en la cuenca del Tempisque derivados de factores naturales y humanos tendrán un efecto sobre el uso de la tierra

y la distribución de la población. Adicional al uso del recurso hídrico por la actividad agrícola y los centros urbanos, también habrá una demanda creciente de agua por los desarrollos turísticos costeros en Guanacaste. Actualmente, la demanda de agua durante la estación seca en algunos de esos sitios ya excede los suministros de ella, por lo que es transportada en camiones con los consecuentes impactos a nivel económico y ambiental.

En Costa Rica, así como en toda la región centroamericana, el manejo de agua en las cuencas hidrográficas responde a políticas dictadas a nivel nacional que pueden ser limitadas o facilitadas por el marco legal e institucional del país. Sin embargo, aunque el país es visto como un Estado progresivo por sus políticas de conservación de áreas, muchas de las estrategias sobre el uso y el manejo de agua siguen basándose en una ley anticuada (de 1942) que carece de los instrumentos que han sido probados en otros escenarios para la protección del recurso.

Varias metodologías de ciencias sociales aplicadas a estudios ambientales han sido empleadas para dilucidar los patrones de uso de la tierra y los cambios de cobertura en la región. Por ejemplo, Daniels y Cummings (2008) investigaron recientemente cómo el uso de la tierra ha cambiado en el Tempisque y cómo estos cambios han afectado sus humedales, empleando técnicas de investigación socioeconómica basada en propietarios de la región, sensores remotos y un análisis de política económica. Además, Daniels (2006) investigó la eficiencia del pago de servicios ambientales en la protección del bosque en esa región comparándolo con otras metodologías de protección.

#### *Factores económicos*

Como se ha mencionado, esta cuenca incluye un gran número de actividades económicas basadas en el recurso hídrico, entre ellas: acuacultura, cultivos con alta dependencia del agua, producción de energía hidroeléctrica, turismo ri-

pario y lacustre. La forma en que estas empresas convierten recursos en salidas (productos) y la retroalimentación de la producción en el ecosistema dependen críticamente de cómo los administradores de esas empresas responden a incentivos generados por un amplio repertorio de estructuras institucionales que regulan el uso del recurso.

Análisis económicos permiten determinar cómo y por qué los seres humanos gestionan de manera diferente los recursos, tanto los de propiedad privada asignados por los mercados con estructuras competitivas (Bhat y Huffaker, 2007), como los disponibles en los regímenes de acceso abierto o regímenes asignados a comunidades (Bhat, Huffaker y Lenhart, 1993), y como los que se asignan por el favor del Gobierno (Huffaker y Hamilton, 2007). En particular, la bioeconomía matemática incorpora variables biofísicas en modelos económicos que sean capaces de investigar un manejo sostenible óptimo de los recursos de ecosistemas en actividades productivas (Grimsrud y Huffaker, 2006).

Los objetivos del análisis económico de este proyecto serán: (1) identificar las estructuras regulatorias y de incentivos que gobiernan el uso de recursos por parte de las empresas económicas que operan en la cuenca del Tempisque; (2) investigar los impactos de esas estructuras en los servicios del ecosistema, y (3) recomendar instrumentos económicos que organicen el comportamiento privado con objetivos sociales del ambiente.

## **Desarrollo preliminar de un modelo integral y análisis de vacíos**

Una parte crítica de un análisis interdisciplinario e integral es la negociación de diversos conceptos analíticos en variadas escalas. A menudo, los esfuerzos de integración se dejan hasta las fases finales de un proyecto, cuando las ideas ya

han sido fijadas y se encuentran osificadas. Nosotros proponemos el desarrollo de un modelo exploratorio integrador como una herramienta central (figura 2) que serviría para: (1) sintetizar la información disponible reunida a partir de acuerdos interinstitucionales, (2) refinar nuestro entendimiento actual del sistema e (3) identificar vacíos en información que sean cruciales para alcanzar nuestros objetivos y que permitan el desarrollo de teorías y conceptos para una propuesta posterior. De esta manera, el modelaje sería un componente integral para catalizar de forma interactiva la experiencia de nuestro equipo y refinar nuestro entendimiento del sistema. La construcción del modelo y la interpretación de los resultados de simulaciones en formatos multimedia para discusiones de grupo permitirían la negociación en distintas escalas, conceptos y visiones del mundo.

## Desarrollo de un modelo exploratorio integrado

El sistema de modelaje *QnD* fue desarrollado por uno de los participantes de esta propuesta (Kiker, Rivers-Moore, M. K. Kiker y Linkov, 2006) para integrar modelos conceptuales y diagramas de ecosistemas, manejo, economía y factores sociopolíticos en un módulo para modelar amigable. El código base está escrito en *java* y es objeto-orientado, y puede implementarse como programas independientes o como aplicaciones basadas en la web.

*QnD* enlaza componentes espaciales con información geográfica de *sig* para modelar interacciones entre factores abióticos (clima) y bióticos en cualquier ecosistema. Los modelos pueden ser construidos usando cualquier combinación de datos técnicos detallados o de interacciones teóricas de fuerzas ecológicas, sociales, económicas o de gestión dentro del ecosistema. El desarrollo de modelos es interactivo y puede iniciarse rápidamente a través de consultas con usuarios o grupos interesados. Las reglas, lógica y operaciones numéricas del programa están implementadas en un forma-

to modular basado en XML (Extensible Markup Language) para implementar relaciones simples o complejas entre los objetos. Con esta estructura modular se pueden agregar modificaciones y/o procesos más detallados durante el desarrollo del modelo. Esto le confiere una tremenda versatilidad pues no se requiere esperar a tener todos los datos antes de empezar a modelar. *QnD* puede ser usado para crear una imagen sencilla del sistema para promover mayor aprendizaje y discusión del panel de expertos o puede ser empleado en un papel de modelaje riguroso para simular elementos del sistema obtenidos de datos de campo (figura 2).

Como se juega con varios escenarios, las interacciones socioeconómicas y ecológicas son expuestas y las posibilidades futuras del sistema son evaluadas. El modelo *QnD* será empleado para explorar elementos espaciales y temporales de la cuenca del Tempisque en detalle, en términos de sus características ecológicas y sus particularidades socioecológicas vinculadas (Kiker, Muñoz-Carpeta, Wolski, Cathey, Gaughn y Kim, 2008).

Para el modelaje, pretendemos integrar *QnD* con análisis de sensibilidad global (GSA por sus siglas en inglés) y análisis de incertidumbre (UA) para permitir la evaluación de incertidumbre en una serie de situaciones de variada complejidad (Muñoz-Carpeta y Muller, 2009; Jawitz, Muñoz-Carpeta, Muller, Stuart, Grace y James, 2008). El análisis de sensibilidad global es el estudio de cómo la incertidumbre en el resultado (salida) de un modelo puede ser asignada a diferentes fuentes de incertidumbre en los parámetros iniciales (entradas) del modelo. Por otro lado, el análisis de incertidumbre se basa en una serie de técnicas para determinar la fiabilidad de las predicciones del modelo, tomando en cuenta las diferentes fuentes de incertidumbre en la entrada del modelo. La lógica de los análisis de incertidumbre y sensibilidad es la siguiente: para un modelo particular, se define un rango de posibles valores para cada factor de entrada (datos, parámetros, retroalimentación, etc.) y el GSA/UA

**Figura 2.** Modelo conceptual preliminar del manejo hídrico en la cuenca Arenal-Tempisque.



muestrea aleatoriamente dentro de esos rangos para seleccionar valores para cada factor de entrada. De esta manera, crea conjuntos de entrada que consisten en diversas combinaciones de valores de los factores iniciales. Esto permite una evaluación metódica del sistema de modelado con el fin de observar si la entrada de diferentes conjuntos de datos produce variación en las salidas del modelo, luego de muchas simulaciones. Entonces, se realiza un análisis de UA para determinar el grado de incertidumbra en las predicciones del modelo, así como un GSA para identificar la entrada de factores e interacciones responsables con la incertidumbra.

Las múltiples simulaciones involucradas producen una función de distribución de probabilidad para cada indicador de salida del sistema (Muñoz-Carpeta, Zajac y Kuo, 2007).

Los análisis de sensibilidad global y de incertidumbra permitirían: (1) examinar el comportamiento del modelo, (2) simplificar o ajustar el modelo, (3) identificar factores de entrada importantes para guiar la respuesta del sistema modelado, (4) identificar parámetros de entrada que deberían ser medidos o estimados más adecuadamente para reducir la incertidumbre de las salidas del modelo, (5) identificar localidades óptimas donde datos adicionales deban ser medidos para reducir la incertidumbre del modelo y (6) cuantificar la incertidumbre de los resultados modelados (Saltelli, Ratto, Tarantola y Campolongo, 2005). La inclusión de análisis de incertidumbre y de sensibilidad global durante el desarrollo

preliminar del modelo permitirá evaluar esta metodología en el desarrollo de modelos integrados y complejos para evaluar conceptos de sostenibilidad de sistemas.

## Otros posibles alcances del proyecto

La creciente demanda de agua, junto con la posible disminución de sus suministros debido al cambio climático, crea condiciones de vulnerabilidad en el Pacífico de Mesoamérica; entre ellas: disminución de la productividad agrícola, pérdida de biodiversidad y limitaciones al crecimiento económico de la región. Una disminución general en el crecimiento económico podría tener implicaciones importantes para el comercio. Por

ejemplo, en 2006, EU exportó \$19,6 mil millones en bienes a Centroamérica e importó cerca de \$19 mil millones en productos, principalmente agrícolas, de la región. La erosión de la agricultura intensiva podría contribuir al aumento de la migración laboral y tener un gran impacto en la economía de Costa Rica. La disminución de la biodiversidad podría erosionar el rico patrimonio natural de la región y la disminución de las aves migratorias neotropicales, lo que a su vez afectaría gravemente la diversidad aviar en EU. A medida que estas vulnerabilidades surgen como una realidad, la región tendrá que invertir en respuestas de adaptación y nuevo capital intelectual. El carácter interdisciplinario de este proyecto facilitaría estas inversiones y mejoraría su eficacia.

## Plan de trabajo

En estos momentos estamos en el proceso de consolidación de un equipo internacional que incluye investigadores del Instituto del Agua de la Universidad de Florida, del Instituto Global de Sostenibilidad de la Universidad del Estado de Arizona, de la Organización para Estudios Tropicales, de la Universidad de Costa Rica, de la Universidad Nacional de Costa Rica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica, de la Fundación Marviva, del Centro Soltis de la Universidad de Texas A&M, y también incluye representantes de instituciones estatales: Cidecat, Senara, Instituto Meteorológico Nacional e Ice.

Cada miembro de este equipo aportaría un bagaje único que se complementa con la experiencia colectiva del grupo: desde ecólogos hasta ingenieros en hidrología y desde geógrafos hasta especialistas en derecho ambiental y en economía de recursos naturales. Para integrar estos esfuerzos estamos: (1) definiendo los objetivos comunes y la visión del proyecto, (2) desarrollando y evaluando mecanismos de coordinación, comunicación, cooperación y síntesis de la información

interdisciplinaria, e (3) identificando los vacíos en información y las preguntas claves que necesitan ser abordadas para entender cómo funciona este complejo sistema.

Estos pasos se iniciaron con el apoyo de unos fondos semilla de la NSF y actualmente invitamos a investigadores e interesados a formular colectivamente hipótesis convincentes para el desarrollo ulterior de propuestas de investigación que permitan alcanzar los objetivos trazados. Estamos llevando a cabo varias actividades (talleres, seminarios y reuniones más pequeñas) para optimizar nuestro plan. También estamos recopilando toda la información existente para utilizarla en la construcción de un modelo exploratorio integrado para llevar a cabo análisis preliminares en las diferentes disciplinas sobre cómo el sistema podría responder en un futuro cercano en diferentes escenarios. Este modelaje preliminar permitirá al grupo multidisciplinario negociar y discutir a través de las barreas disciplinarias, identificar los vacíos de información y los temas clave donde la investigación es necesaria para tener una comprensión realista del complejo sistema a abordar. Así, se podrían formular hipótesis de investigación pertinentes acerca de su comportamiento que modularían estudios posteriores.

El proyecto es ambicioso y complejo y su éxito dependerá de nuestra capacidad de identificar equipos de trabajo que puedan abordar la multitud de temáticas involucradas. Aunque hemos consolidado un equipo multidisciplinario que actualmente está tratando de coordinar varios de estos esfuerzos, tenemos claro que se requerirá mayor participación de la comunidad científica y técnica del país para alcanzar los objetivos a corto y largo plazo que nos hemos trazado, razón por la que instamos al lector interesado a contactarnos.

## Referencias bibliográficas

Anderson, E. R., Flores, E. A., Pérez, A. L., Carrillo, J. B. y Sempris, E. (2008). *Potential Impacts of Climate Change on Biodiversity in Central America*, Mexico,

- and the Dominican Republic.* CATHALAC/USAID Panama City, Panama 105 pp.
- Ballesteros, M., Reyes, V. y Astorga, Y. (2007). Groundwater in Central America: Its importance, development and use, with particular reference to its role in irrigated agriculture. En Giordano, M y Villholth, K.G. (Ed.), *The Agricultural Groundwater Revolution: 100 Opportunities and Threats to Development.* (pp. 100-128). CAB International.
- Bhat, M. y Huffaker, R. (2007). Optimal Management of a Transboundary Migratory Wildlife Population: A Self-Enforcing Cooperative Agreement with Renegotiation and Variable Transfer Payments. *Journal of Environmental Economics and Management*, (53), 54-67.
- Bhat, M. G., Huffaker, R. G y Lenhart, S. M. (1993). Controlling Forest Damage by Dispersive Beaver Populations. *Ecological Applications*, (3), 518-530.
- Birkel, C. y Demuth, S. (2006). Drought in Costa Rica – Temporal and spatial behaviour, trends and the relationship to atmospheric circulation. En Demuth, S., Gustard, A., Planos, E., Scatena, F. y Servat, E. (Ed.), *Climate Variability and Change – Hydrological Impact.* Vth International FRIEND World Conference. (pp. 338-343). IAHS Publ. 308.
- Cassidy, L., Binford, M., Southworth, J. y Barnes, G. (*en prensa*). Social and ecological factors and land-use land-cover diversity in two provinces in south-east Asia. *Land Use Science*.
- Gibbes, C., Southworth, J. y Keys, E. (2009). Wetland conservation: Change and fragmentation in Trinidad's protected areas. *GeoForum* (40), 91-104.
- Daniels, A., Painter, K. y Southworth, J. (2008). Milpa imprint on the tropical dry forest landscape in Yucatan, Mexico: Remote sensing & field measurement of edge vegetation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (123), 293-304.
- Daniels, A. E. (2006). Incorporating domain knowledge and spatial relationships into land cover classifications: a rule based approach. *International Journal of Remote Sensing* (27), 2949-2975.
- Daniels, A. E y Cumming, G. S. (2008). Conversion or Conservation? Understanding wetland change in northwest Costa Rica. *Ecological Applications* (18), 49-63.
- Grimsrud, K. y Huffaker, R. (2006). Solving Multidimensional Bioeconomic Problems with Singular-Perturbation Reduction Methods: Application to Managing Pest Resistance to Pesticidal Crops. *Journal of Environmental Economics and Management* (51), 336-353.
- Huffaker, R. G. y Hamilton, J. (2007). Conflict in U.S. Irrigation. En Lascano and Sojka, R. (Ed), *Irrigation of Agricultural Crops Monograph.* (pp. 3-22). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Jawitz, J. W., Muñoz-Carpena, Rafael, Muller, Stuart, Grace, K. A., y James A.I. (2008). *Development, Testing, and Sensitivity and Uncertainty Analyses of a Transport and Reaction Simulation Engine (TaRSE) for Spatially Distributed Modeling of Phosphorus in South Florida Peat Marsh Wetlands.* U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5029.
- Jiménez, J. y González, E. (2001). *La cuenca del Río Tempisque: perspectivas para un manejo integrado.* Organización para Estudios Tropicales, San José, Costa Rica.
- Karmalkar, A. V., Bradley, R. S. y Diaz, H. F. (2008). Climate change scenario for Costa Rican montane forests. *Geophys. Res. Lett.* 35.
- Kiker, G. A., Rivers-Moore, N. A., Kiker, M.K. y Linkov, I. (2006). QnD: A scenario-based gaming system for modeling environmental processes and management decisions. En Morel, B. y Linkov, I. (Ed.), *Environmental Security and Environmental Management: The Role of Risk Assessment*, (pp. 151-185). Springer Verlag: The Netherlands.
- Kiker, G. A., Muñoz-Carpena, R., Wolski, P., Cathey, A., Gaughn, A. y Kim, J. (2008). Incorporating Uncertainty into Adaptive, Transboundary Water Challenges: a conceptual design for the Okavango River Basin. *International Journal of Risk Assessment and Management* (10), 312-338.
- Lele, N., Harini Nagendra y Southworth, J. (2010). Accessibility, Demography and Protection: Drivers of Forest Stability and Change at Multiple Scales in the Caurey Basin. *India Remote Sensing*, (2), 306-332.
- Magrin, G., Gay García, C., Cruz Choque, D., Giménez, J., Moreno, A., Nagy, G. J., Nobre, C. y Villamizar, A. (2007). Latin America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel. En Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J. y Hanson, C. E. (Ed.), *Climate Change* (pp. 581-615). Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Moellendorf, S. M. y Crisman, T. L. (2010a). *Ecohydrology of headwater intermittent and perennial streams in the dry forests of Costa Rica.* (In Preparation).
- Moellendorf, S. M. y Crisman, T. L. (2010b). *The biotic structure of tropical irrigation canal networks: the Canal Continuum.* (In Preparation).
- Moellendorf, S. M. y Crisman, T. L. (2010c). *Upstream and downstream interactions in a Costa Rican stream associated with forest clearing.* (In Preparation).
- Mondal, P., Southworth, J. 2010. Protection vs. Commercial management: spatial and temporal analysis of land

- cover changes in the tropical forests of Central India. *Forest Ecology and Management* 259 (5), 1009 -1017.
- Muñoz-Carpena, R. y Muller, S. J. (2009). Formal Exploration of the Complexity and Relevance of Biogeochemical Models through Global Sensitivity and Uncertainty Analysis: Opportunities and Challenges. En Silva, O. y Carrera-Ramírez, J. (Ed.), *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo, Vol. IX* (pp. 27-40). CIMNE: Barcelona.
- Muñoz-Carpena, R., Zajac, Z. y Yi-Ming Kuo. (2007). Global Sensitivity and uncertainty Analyses of the Water Quality Model VFSMOD-W. *Trans. of ASABE* 50(5), 1719-1732.
- National Research Council. (2009). *Landscapes on the Edge: New Horizons for Research on Earth's Surface. Committee on Challenges and Opportunities in Earth Surface Processes*. National Research Council. National Academies Press: Washington, DC.
- Osland J., González, E. y Richardson, C. J. (2010). Plant and avian community response to cattail (*Typha* sp.) removal via fangueo in a tropical dry wetland: implications for restoration and invasive plant management. *Ecological Applications* (en presa).
- Poveda, G., Waylen, P. y Pulwarty, R. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, (234), 3-27.
- Pringle, C. M. (2001). Hydrologic connectivity and the management of Biological reserves: a global perspective. *Ecological Applications*, (11), 981-998.
- Quesada, M. E. y Waylen, P. R. (2004). Ocurrencia de caudales máximos en cuencas hidrográficas ubicadas en vertientes opuestas, Costa Rica. *Ingeniería Hidráulica en México*, XIX, (3), 129-138.
- República de Costa Rica. (2010, abril 13). Gobierno presenta proyecto para garantizar abastecimiento de agua en Guanacaste por los próximos 50 años. Disponible en [http://www.casapres.go.cr/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=423:gobierno-presenta-proyecto-para-garantizar-abastecimiento-de-agua-en-guanacaste-por-los-pr%C3%B3ximos-50-a%C3%B1os&Itemid=18](http://www.casapres.go.cr/index.php?option=com_k2&view=item&id=423:gobierno-presenta-proyecto-para-garantizar-abastecimiento-de-agua-en-guanacaste-por-los-pr%C3%B3ximos-50-a%C3%B1os&Itemid=18)
- Saltelli, A., Ratto, M., Tarantola, S., Campolongo, F. (2005). Sensitivity analysis for chemical models. *Chem Rev*, (105), 2811-2827.
- Southworth, J., Cumming, G., Marsik, M. y Binford, M. (2006). Linking Spatial and Temporal Variation at Multiple Scales in a Heterogeneous Landscape. *Professional Geographer*, (58), 406-420.
- Stickler, C. y Southworth, J. (2008). Application of a multi-scale spatial and spectral analysis to predict primate occurrence and habitat associations in Kibale National Park, Uganda. *Remote Sensing of Environment*, (112), 2170-2186.
- Trama, F. A. (2004). Restauración de humedal Palo Verde para aves. *Ambientico* (129), 11-12.
- Trama, F. A. (2005). *Manejo activo y restauración del humedal Palo Verde: cambios en las coberturas de vegetación y respuesta de las aves acuáticas*. (M. Sc. Tesis. Universidad Nacional, Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre para Mesoamérica y El Caribe. Heredia, Costa Rica).
- Tuxtla (2009). XI cumbre de Jefes de Estado y de Gobierno del mecanismo de diálogo y concertación de Tuxtla, Guanacaste, Costa Rica. Disponible en <http://docs.google.com/Doc?docid=0AZSfpSOxHp32ZHNjc3hoel82NzlocDdyZnRx&hl=en>
- Vannote, R., Minshall, G., Cummins, K., Sedell J. y Cushing, C. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* (37), 130-137.
- Waylen, P., Quesada, E., Caviedes, N., (1996a). Temporal and spatial variability of annual precipitation in Costa Rica and the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, (16), 173-193.
- Waylen, P., Caviedes, C. y Quesada, M. (1996b). Interannual variability of monthly precipitation in Costa Rica. *Journal of Climate* (9), 2606-2613.
- Waylen, P. R. y Laporte, S. (1999). Flooding and the El Niño-Southern Oscillation phenomenon along the Pacific Coast of Costa Rica. *Hydrological Processes* (13), 2623-2638.

## Agradecimientos

A Yamileth Astorga del Programa de Gestión Ambiental de la Universidad de Costa Rica por algunas de sus ideas expuestas aquí. Al programa Catalizando Nuevas Colaboraciones Internacionales de la NSF (EU), a la Vicerrectoría de Investigación de la UCR (541-B1-517) y a Holcim Costa Rica por su apoyo financiero para la organización y las recopilaciones iniciales de datos.