

Servicios ecosistémicos e hidroenergía en Costa Rica

E.J. Leguía¹, B. Locatelli², P. Imbach, C.J. Pérez, R. Vignola³

(1) Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Grupo Cambio Global, Turrialba, Costa Rica.

(2) Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Grupo Cambio Global, Turrialba, C. Rica.

Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) UPR Ressources Forestières, Montpellier 34398 Francia.

(3) Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Grupo Cambio Global, Turrialba, Costa Rica.

➤ Recibido el 8 de noviembre de 2007, aceptado el 24 de enero de 2008.

Servicios ecosistémicos e hidroelectricidad en Costa Rica. El objetivo de este estudio es identificar los ecosistemas forestales que provén servicios ecosistémicos hídricos (SEH) importantes para la adaptación del sector hidroenergético al cambio climático en Costa Rica. Se evaluó un marco metodológico que tomó en cuenta los vínculos espaciales entre usos del suelo, su capacidad de producir SEH y la utilidad que las centrales hidroeléctricas obtienen de los SEH, en un contexto de vulnerabilidad a eventos climáticos. Las centrales hidroeléctricas reciben SEH del 24% del territorio nacional, que en su mayoría está bajo cobertura forestal (52%). Las cuencas del río Reventazón, Grande de Tárcoles y Grande de Terraba son las más importantes en términos de área que provee SEH. Cerca del 70% de los ecosistemas forestales identificados como relevantes para la hidroenergía se encuentran fuera de áreas protegidas. Los resultados de este trabajo son de importancia para la implementación de planes de manejo adaptativo de los ecosistemas prioritarios para garantizar el flujo continuo de SEH y así contribuir a la resiliencia del sector hidroenergético, en particular frente al cambio climático.

Palabras claves: hidroelectricidad, ecosistemas forestales, vulnerabilidad

Ecosystem services and hydropower generation in Costa Rica. The purpose of this study is to identify forest ecosystems that provide hydrological ecosystem services (HES) relevant for the adaptive capacity to climate change in the hydropower sector of Costa Rica. We assessed a methodological framework that considers spatial linkages between land use, capacity of the ecosystem to produce environmental services, and the utility that hydropower plants derive from those HES in a context of vulnerability to climatic events. Hydropower plants receive HES from 24% of the national territory, where forest cover represents 52% of land use. The watersheds of Rio Reventazón, Grande de Tárcoles and Grande de Terraba are the more important in terms of area providing HES. Approximately 70% of forest ecosystems identified during the course of this study providing HES to the hydropower sector are currently outside the national protected areas system. The results of this study are relevant for the implementation of adaptive management plans in forest ecosystems providing HES, and thus, improve the resilience to climate change in the hydropower sector.

Key words: hydroelectric power, forest ecosystems, vulnerability

Introducción

Gracias a complejas interacciones biológicas, químicas y físicas, los ecosistemas brindan servicios de gran importancia para el desarrollo y la sustentabilidad de diversos sectores a nivel mundial (Daily *et al.*, 1997; Millenium Ecosystem Assessment, 2003). Sin embargo, el aprovechamiento irracional de los ecosistemas y, más recientemente, el cambio climático, están interfiriendo el flujo de estos servicios ecosistémicos (SE) (IPCC, 2001).

La relevancia de los ecosistemas forestales para la sociedad depende de los servicios que éstos producen y de su aprovechamiento por los sectores que componen la sociedad (IPCC, 2001). Los servicios ecosistémicos hídricos (SEH) benefician a diversos sectores, entre ellos el hidroenergético (Guo, 2000; Pagiola, 2002), el cual es clave para el desarrollo de muchos países (Klimpt *et al.*, 2002; Reddy *et al.*, 2006; Yuksek *et al.*, 2006). Sin embargo, el cambio climático y la variabilidad climática están impactando los SEH y los bosques, incrementando la vulnerabilidad del sector hidroenergético (IPCC, 2001; Margin *et al.*, 2007).

En América Central, el sector energético de Costa Rica genera el 98% de su electricidad a partir de recursos renovables, y dentro de éstos, el más importante es el hídrico (CEPAL, 2006). Eventos extremos como por ejemplo, la sequía del 2001 que provocó una reducción en la generación eléctrica estimada en 165 GWh, ocasionó al país pérdidas equivalentes a 8,8 millones de dólares (CEPAL, 2002). De otro lado, las altas precipitaciones y usos del suelo en la cuenca del río Reventazón favorecen procesos de erosión y desencadenan problemas de sedimentación en embalses Cachí y Angostura, quienes reciben alrededor de 1 a 2 millones de toneladas de sedimentos al año (Jiménez *et al.*, 2005).

En este estudio se busca validar una metodología para identificar los ecosistemas forestales que proveen SEH y favorecen la adaptación del sector hidroeléctrico de Costa Rica al cambio climático y a la variabilidad climática. Una vez identificados y establecido su posicionamiento geográfico, se hará una breve comparación con el grado de conservación o protección jurídica que se ha establecido para los bosques en este país.

Metodologías

Este marco metodológico enfatiza los vínculos entre los diferentes usos del suelo, su capacidad de producir SEH y la utilidad que obtienen los usuarios (sectores socioeconómicos) de su “consumo” en un contexto de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Para clarificar estos vínculos se tomó como ejemplo el sector hidroeléctrico y los SEH que influyen en la capacidad de las centrales para generar electricidad en Costa Rica. Este enfoque, además, se basa en el supuesto de la no rivalidad de los SEH.

Se definieron las tipologías de los tres componentes de este marco metodológico: usos del suelo, SEH y usuarios de los SEH.

El mapa de usos de suelo de Costa Rica de 1997 (ITCR, 2004; Imbach, 2005) fue reclasificado en: bosques, cultivos anuales, cultivos perennes, pastos, y otros usos fuera de los anteriores. La superficie nacional se dividió en 40.019 microcuencas, con un área promedio de 1,21 km² (TNC, 2007).

Se consideraron los siguientes SEH relevantes para el sector hidroeléctrico: reducción de sedimentación, reducción de caudales máximos, mantenimiento de caudales mínimos y mantenimiento del volumen total de agua en la cuenca (Guo *et al.*, 2000; Millenium Ecosystem Assessment, 2003).

Los usuarios de los SEH son las centrales hidroeléctricas, las cuales fueron clasificadas en dos tipos, de acuerdo con su capacidad para almacenar agua: centrales con embalses (62 centrales) y centrales a filo de agua (42 centrales). Se usó la relación y ubicación de las centrales hidroeléctricas creado por el proyecto ECOMERCADOS y reportado en el atlas digital de Costa Rica 2004 (ECOMERCADOS, 2000) para asignar el valor de la capacidad instalada de cada central a la microcuenca en la cual estaba ubicada.

Para evaluar la vulnerabilidad del sector, se consideró solo aquellas microcuencas en las que había presencia de centrales hidroeléctricas. Para esto, se tomaron en cuenta criterios de sensibilidad y capacidad adaptativa a través de un índice construido por la sensibilidad a eventos climáticos menos la capacidad adaptativa (Adger *et al.*, 2003; IPCC, 2001). El índice de sensibilidad a eventos climáticos fue definido por la suma de amenazas a inundaciones, deslizamientos y sequías (ITCR, 2004). La capacidad adaptativa está directamente relacionada con la capacidad financiera de la empresa. Así, empresas como Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), Junta Administradora de los Servicios Eléctricos de Cartago (JASEC), Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH), tendrán mejor capacidad de adaptación que empresas pequeñas de capital limitado.

Producción y utilidad de SEH: Definición de relaciones

La relación que existe entre los usos del suelo y las centrales hidroeléctricas está definida por el potencial que tienen los primeros de producir SEH (**Tabla 1**) y la utilidad que obtienen las centrales hidroeléctricas del consumo de estos SEH (**Tabla 2**). Estos valores fueron asignados a partir de la información recogida en literatura relevante.

Tabla 1. Capacidad de los diferentes usos del suelo de producir SEH.

	Reducción Sedimentación	Regulación caudales máximos	Regulación caudales mínimos	Cantidad total de agua en la cuenca
Bosques	Alta	Media-Alta	Media-Alta	Media-baja

C. anuales	Baja	Baja	Baja	Alta
C. perennes	Media	Media	Media	Media
Pasturas	Media	Media	Media	Alta
Otros	Baja	Baja	Baja	Baja

Tabla 2. Utilidad de SEH para las centrales hidroeléctricas

	Reducción sedimentación	Regulación caudales máximos	Regulación caudales mínimos	Cantidad total de agua en la cuenca
Embalse	Alta	Baja	Baja	Alta
Filo de agua	Media	Baja	Alta	Media

Los bosques protegen al suelo de la erosión, manteniendo su estabilidad y reduciendo los problemas de sedimentación mejor que los otros usos del suelo (Gómez, 2002; Pagiola, 2002). Sin embargo, su aporte en cuanto a la regulación de caudales máximos y mínimos es menos claro, debido a su mayor nivel de evapotranspiración y extracción de agua del subsuelo (Bruijnzeel *et al.*, 2004; Bruijnzeel, 2004). Los diferentes usuarios valoran diferentemente los SEH. Por ejemplo, para los embalses, los SEH más importantes son el mantenimiento de la cantidad total anual de agua y la reducción de sedimentos (Southgate y Macke, 1989). Al contrario, para las plantas hidroeléctricas a filo de agua, los cursos de agua deben cumplir con un [caudal mínimo de diseño](#)(1) para poder funcionar; en época seca, generalmente se cuenta con caudales inferiores a este valor, por lo que la regulación de caudales mínimos constituye el SEH más importante para este tipo de central.

Se usó la teoría de conjuntos difusos (*fuzzy sets*) (Terano *et al.*, 1987) para tomar en cuenta la ambigüedad y traslape de los términos lingüísticos cualitativos de las **Tablas 1 y 2**. A cada término se le asignó un [intervalo de valores](#) (2) en el eje horizontal, mientras que en el eje vertical se consideró el grado de membresía de cada valor (**Fig. 1**) (Chen y Hwang, 1992).

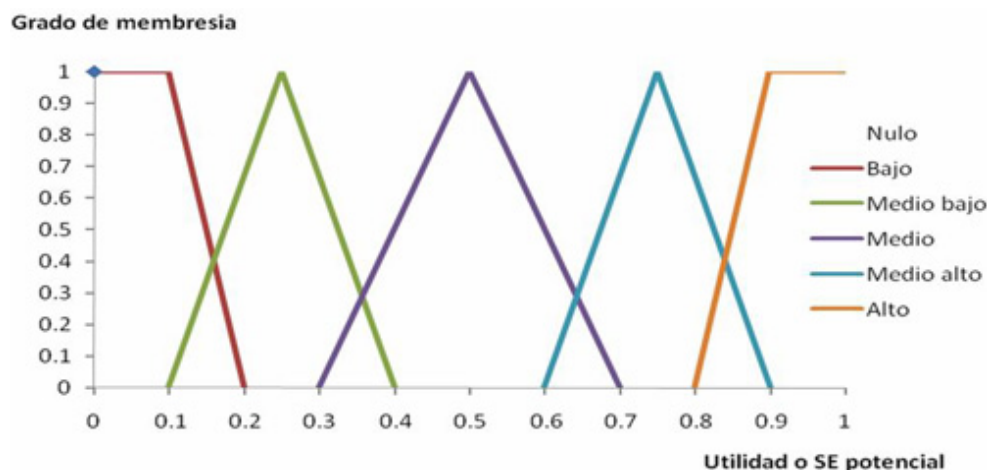


Figura 1. Transformación de términos lingüísticos a números fuzzy.

Los datos fueron analizados usando el software MATLAB y aritmética de conjuntos difusos (Stefaninia, 2006). El proceso fue dividido en dos etapas. En la primera, se hizo énfasis en los usuarios de los SEH. Se asumió que la importancia de los ecosistemas para la adaptación del sector hidroenergético depende del beneficio que obtienen los usuarios de los SEH, y que este beneficio es más alto para usuarios más vulnerables. El beneficio para un usuario de recibir los SEH de un cierto tipo en contexto de cambio climático se definió como el producto de la vulnerabilidad del usuario y la utilidad que obtiene del servicio (**Ecuación 1**).

$$\text{Beneficio}(s, c, u) = \text{Utilidad}(u, s) * \text{Vulnerabilidad}(s) \quad (1)$$

Luego, para cada usuario, se calculó la cantidad de cada tipo de SEH recibidos de las cuencas aguas arriba. (**Ecuaciones 2 y 3**).

$$Producción(s, e) = \sum_{f \in F} \text{área}(f, s_{up}) * PSEH(f, e) \quad (2)$$

Mientras que la oferta total de SEH esta expresado por la suma de producción de SEH de todos los usos del suelo (**Ecuación 3**).

$$Oferta(s, e) = \sum_{s_{up} \in \text{origen}(s, e)} Producción(s_{up}, e) = \sum_{s_{up} \in \text{origen}(s, e)} \sum_{f \in F} \text{área}(f, s_{up}) * PSEH(f, e) \quad (3)$$

Finalmente, se calculó el beneficio unitario (cociente entre el beneficio y la cantidad de cada SEH), que es más alto para los usuarios que reciben menos SEH y que son más vulnerables o tienen una utilidad más alta del SEH.

$$\text{Beneficio unitario} = \frac{\text{Beneficio}(s, e, u)}{\text{Oferta}(s, e)} \quad (4)$$

La segunda etapa hizo énfasis en los ecosistemas, y se asumió que la importancia de los ecosistemas de una microcuenca depende de tres factores: la cantidad de SEH producidos por los ecosistemas aguas arriba de las centrales hidroeléctricas, la cantidad de usuarios (capacidad instalada total en MW) aguas abajo de las microcuencas “origen” de los SEH, y el beneficio unitario de cada SEH para los usuarios aguas abajo de las microcuencas “origen” de los SEH (**Ecuación 5**).

$$EI(s) = \sum_{e \in E} Producción(s_{up}, e) * \left(\sum_{u \in U} \sum_{s_{down} \in \text{dest}(s, e)} \text{BeneficioUnitario}(s_{down}, e, u) * \text{presencia}(s_{down}, u) \right) \quad (5)$$

Los resultados fueron reconvertidos o “desfuzzificados” para encontrar un único valor de referencia (centro de gravedad) (Wang y Elhag, 2006). Finalmente los valores diferentes de cero (aquellos que no tienen ninguna relevancia para las centrales hidroeléctricas) fueron clasificados en cinco categorías (muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto) a través de percentiles. Estos datos fueron exportados a formato SIG para construir los mapas de importancia de usos del suelo proveedores de SEH para las centrales hidroeléctricas.

Resultados y discusión

La capacidad hidroeléctrica instalada de Costa Rica es 2348 MW y está distribuida en 93 microcuencas (ITCR, 2004). Estas centrales reciben SEH de 7070,5 km² de cuencas aguas arriba de las centrales hidroeléctricas (13,5% de la superficie nacional). De esta superficie poco más de la mitad (52%) está cubierta por bosques (**Fig. 2**). El área total de ecosistemas que producen SEH para las centrales con embalse es notoriamente mayor al área para centrales a filo de agua (6183,6 km² contra 1204,6 km²) con un promedio de 184 km² para las centrales con embalse y 40 km² para aquellas a filo de agua.

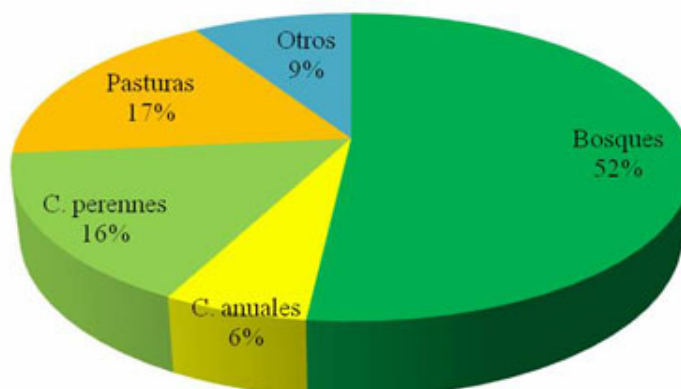


Figura 2. Distribución de usos del suelo aguas arriba de centrales hidroeléctricas en Costa Rica.

Las cuencas con mayor superficie de ecosistemas forestales relevantes para las centrales hidroeléctricas son las del río Reventazón, Grande de Tárcos y Grande Terraba (**Tabla 4**), y éstas se ubican en la cordillera central (**Fig. 3**). Por otro lado, la cuenca del río Reventazón es la de mayor importancia debido a la capacidad instalada de las centrales hidroeléctricas ubicadas en esta cuenca (ITCR, 2004), entre las cuales, Cachí y Angostura destacan claramente. Ambas con problemas de sedimentación que requiere inversión en labores de limpieza (Jiménez *et al.*, 2005). Así mismo, la cuenca del río Bebedero, en la que se encuentra la central Arenal, recibe SEH de aproximadamente 443 km².

Tabla 4. Principales cuencas generadoras de SEH para el sector hidroeléctrico.

Cuenca	Capacidad instalada	Área cuenca	Bosques relevantes	Proporción de la cuenca
	<i>MW</i>	<i>Km²</i>		%
Reventazón	638,48	2832	1487	53
G. Tárcos	183,00	2199	1402	64
G. Terraba	263,27	4941	1088	22

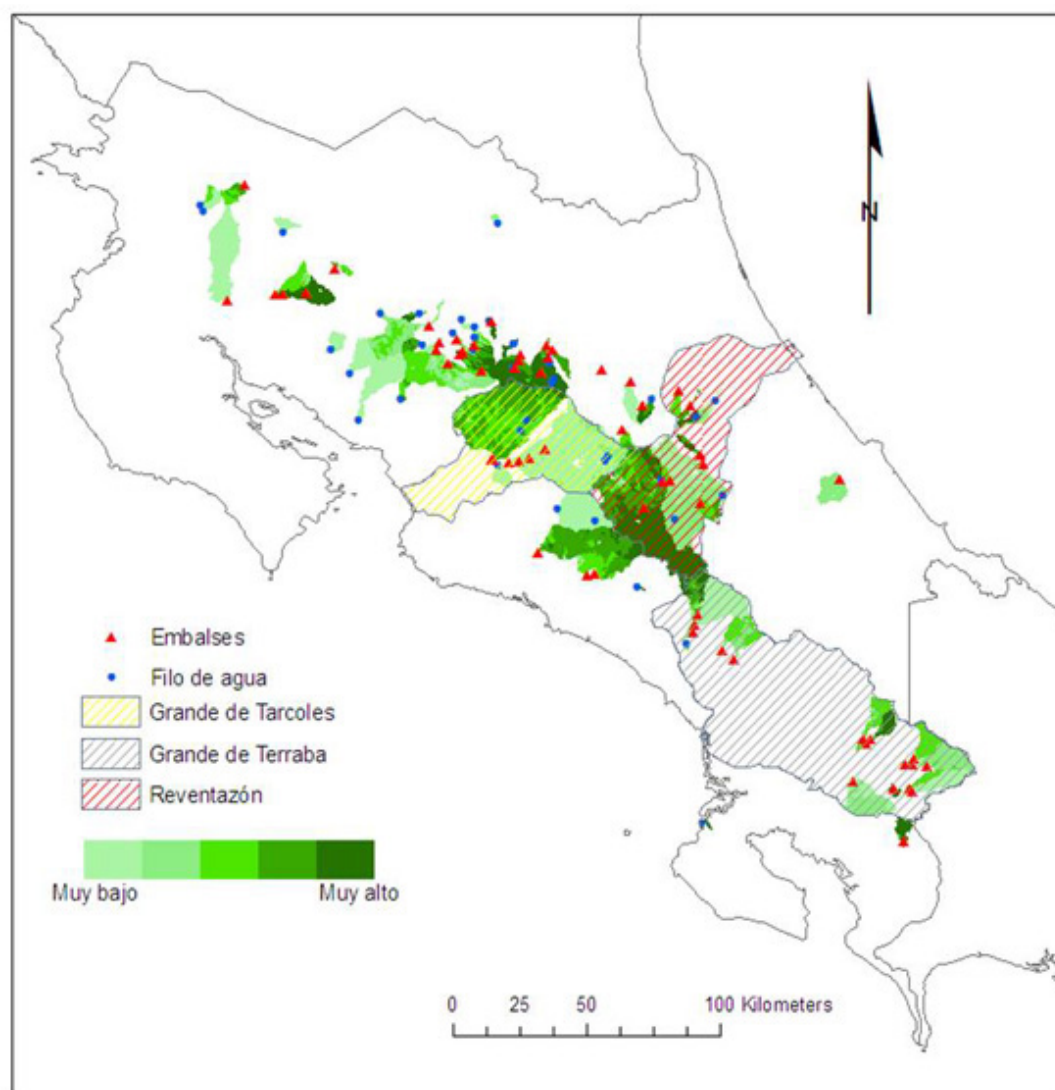


Figura 3. Bosques proveedores de SEH para las centrales hidroeléctricas en Costa Rica. La intensidad de colores muestra, de forma ordinal, el nivel de importancia de los bosques para las centrales hidroeléctricas.

Costa Rica cuenta con aproximadamente 14.300 km² (27% de su superficie) bajo el esquema de áreas protegidas y Parques Nacionales (SINAC, 1999). El 31% (2174 km²) de los ecosistemas relevantes para las centrales hidroeléctricas están dentro del esquema de áreas protegidas y Parques Nacionales (**Fig. 4**). Esto quiere decir que cerca del 70% de los ecosistemas relevantes para las centrales hidroeléctricas requieren de mecanismos que garanticen el flujo de SEH de utilidad para el sector.

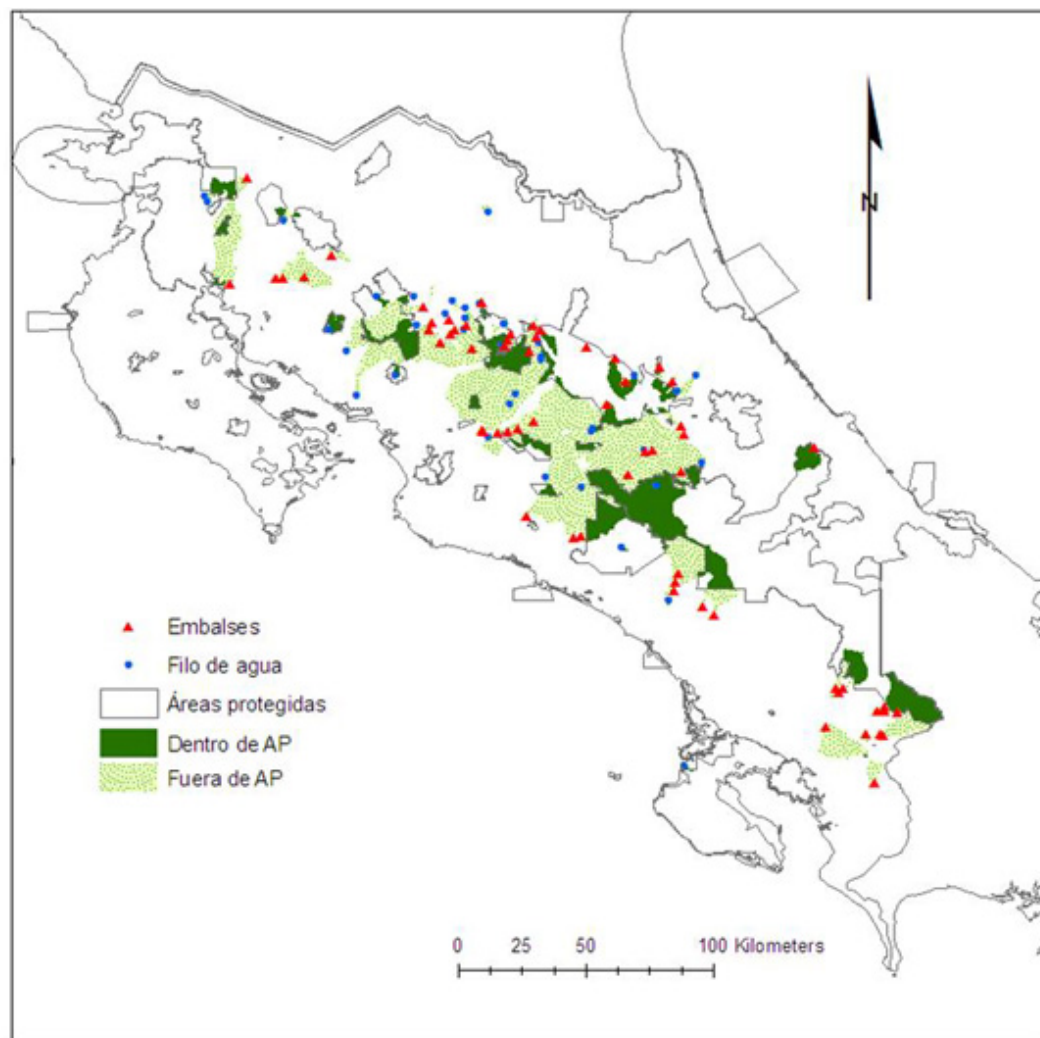


Figura 4. Bosques importantes para el sector hidroeléctrico y áreas protegidas. El color verde intenso hace referencia a los bosques que proveen SEH para las centrales hidroeléctricas que se encuentran dentro de áreas protegidas, mientras que el color verde claro corresponde a aquellos bosques importantes que están fuera de áreas protegidas.

Este marco metodológico utiliza parámetros prácticos y aplicables a cualquier tipo de uso del suelo, sector y servicio ecosistémico no rival. Otras metodologías de identificación de áreas se basan en la aplicación de herramientas que buscan dar un valor económico a los servicios ecosistémicos, y finalmente, otras incorporan más de un sector en su análisis (Imbach, 2005; Troy *et al.*, 2006). Uno de los principales retos del presente trabajo fue la asignación de valores a los SEH que generan los usos del suelo, especialmente los bosques tropicales, debido a la incertidumbre que resulta de la escasez de datos espaciales para Centro América (Pagiola *et al.*, 2002; Bruijnzeel, 2004; Bruijnzeel *et al.*, 2004). La asignación de valores a la utilidad que obtienen las centrales hidroeléctricas del uso de los SEH se podrá mejorar conforme se obtenga más información al respecto.

Conclusiones e implicaciones

Se identificó ecosistemas forestales importantes para el sector hidroenergético con base en su aporte de SEH. Esta metodología es útil para el diseño e implementación de planes de manejo de los ecosistemas forestales con la finalidad de garantizar el flujo continuo de SEH, y aumentar la resiliencia del sector hidroenergético frente a perturbaciones tales como el

cambio climático. Un área considerable de ecosistemas forestales importantes se encuentra fuera áreas protegidas. En tal sentido, es importante poner atención a las actividades que se llevan a cabo en estas cuencas y especialmente en la cuenca del río Reventazón, río Grande de Tárcos y río Grande de Terraba, donde se concentra la mayor capacidad instalada del país. Empresas hidroeléctricas, como ICE, CNFL, JASEC y ESPH, realizan acciones de protección de ecosistemas en las cuencas aguas arriba de sus centrales, entre éstas destacan los planes de reforestación, educación ambiental y de manejo de cuencas. Estas actividades contribuyen a mantener los SEH en las cuencas aguas arriba de sus centrales.

Notas

(1) Nivel mínimo (m.s.n.m.) del curso de agua por debajo del cual las centrales hidroeléctricas a filo de agua no pueden funcionar. [Volver](#)

(2) Se interpreta como la posibilidad (de 0 a 1) que un valor del intervalo en el eje “x”, que está dentro de una clase determinada (ya sea nula, baja, media o alta) pertenezca a esa clase. Se recomienda leer Terano *et al.* (1987) y Chen y Hwang (1992) para una mayor comprensión de los conjuntos difusos. [Volver](#)

Referencias

Adger, N., Huq, S., Brown, K., Conway, D. y Hulem, M., 2003. Adaptation to climate change in developing world. *Progress in Development Studies* 3,3: 179-195

Bruijnzeel, L., 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 185–228

Bruijnzeel, L., Calder, IR. y Vertessy, RA., 2004. Impacts of forest conversion on streamflow. *Hydrology. Encyclopedia of Forest Sciences* Pp. 350-358.

Chen, Sh.J. y Hwang, C. L., 1992. *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag Estados Unidos 536 pp.

CEPAL, 2002. *Impacto socioeconómico y ambiental de la sequía de 2001 en Centro América*. 68 pp.

CEPAL, 2006. *Istmo centroamericano: estadísticas del subsector eléctrico. Informe preliminar del segmento de la producción de electricidad*. (Datos actualizados a 2005). 37 pp.

Daily, G.C., Alexander, S., Ehrlich, P.R., Goulder, L., Lubchenco, J., Matson, P.A., Mooney, H.A., Postel, S., Schneider, S.H., Tilman, D. y Woodwell, G.M., 1997. Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems. *Issues in Ecology* 2. 17 pp.

ECOMERCADOS, 2000. Plantas de generación eléctrica en Costa Rica. In ITCR (Instituto Tecnológico de Costa Rica) 2004. *Atlas digital de Costa Rica*. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, CR.

Guo, Z., Xiao, X. y Lj, D., 2000. An assessment of ecosystem services: water flow regulation and hydroelectric power production. *Ecological Applications* 10: 925-936.

Gómez, F., 2002. *Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica*. Tesis licenciatura en ingeniería civil. San José, CR, UCR. 191 pp.

Imbach, P., 2005. *Priority areas for payment for environmental services (PES) in* . Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 99 pp.

IPCC, 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. McCarthy, J., Canziani, O., Leary, A., Dokken, D., White, K. Eds. Cambridge University Press, . 1000 pp.

ITCR, 2004. Atlas digital de Costa Rica. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, CR.

Jiménez, O., Farias, H.D. y Rodríguez, C., 2005. Procesos de sedimentación en embalses en ambientes tropicales. Estudios

de casos en Costa Rica y República Dominicana. *Ingeniería del agua* 4: 1-15.

Klimpt, J.É., Rivero, C., Puranen, H. y Koch, F. 2002. Recommendations for sustainable hydroelectric development. *Energy Policy* 30: 1305-1312.

Magrin, G., Gay, C., Cruz, D. , Giménez, J.C., Moreno, A.R., 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 IPCC*,. Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. y Hanson, C.E., Eds., Cambridge University Press, Cambridge, . 581-615 pp.

Millenium Ecosystem Assessment, 2003. *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. Island Press, Washington, DC . Estados Unidos. 245 pp.

Pagiola, S., Bishop, J. y Landel-Mills, N., 2002. *Selling forest environmental services. Market-based mechanisms for conservation and development*. Earthscan Publications. Ltd, . 37-62 pp.

Reddy, R.V., Uitto, J.I., Frnas, D.K. y Matin, N. 2006. Achieving global environmental benefits through local development of clean energy? The case of small hilly hydel in . *Energy Policy* 34: 4069-4080.

SINAC, 1999. Áreas protegidas de Costa Rica. In *ITCR (Instituto Tecnológico de Costa Rica) 2004. Atlas digital de Costa Rica*. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, CR.

Southgate , D. y Macke, R., 1989. The downstream benefits of soil conservation in third world hydroelectric watersheds. *Land economics* 65(1):38 - 48

Stefaninia, L., Sorinia, L. y Guerra, M.L., 2006. Parametric representation of fuzzy numbers and application to fuzzy calculus. *Fuzzy Sets and Systems* 157: 2423-2455.

Terano, T., Asai, K. y Sugeno, M., 1987. *Fuzzy systems theory and its applications*. Academic Press. New York, Estados Unidos. 268 pp.

TNC, 2007. *Red de Drenajes de Centroamérica*, Geodatabase. versión 1.0. The Nature Conservancy, Región de Mesoamérica y Caribe, Science Program, San José-Costa Rica.

Troy , A. y Wilson, M. A, 2006. Mapping ecosystem services: Practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer. *Ecological Economics* 60: 435-449.

Wang, Y.M. y Elhag, T.M.S., 2006. On the normalization of interval and fuzzy weigth. *Fuzzy Sets and Systems* 157: 2456-2471.

Yukse, O., Komurcu, M.I., Yuksel, I. y Kaygusuz, K., 2006. The rol of hydropower in meeting 's electric energy demand. *Energy Policy* 34: 3093-3103.