

ARTÍCULO ORIGINAL

Calidad del agua del río Túnico como respuesta al uso del suelo

Water quality of Tunico River in response to land use

M.Sc. José Robledo^I, D.Sc. Eddi Alejandro Vanegas Chacón^{II}, Dr.C. Nancy García Álvarez^{III}

^I Universidad de San Carlos (USAC), Centro Universitario de Izabal, Guatemala.

^{II} Universidad de San Carlos (USAC), Facultad de Agronomía, Guatemala.

^{III} Universidad de Ciego de Ávila (UNICA), Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba.

RESUMEN. La calidad de los cuerpos superficiales de agua de la subcuenca del Río Túnico como expresión del uso de los suelos debe monitorearse a fin de garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas agropecuarios a través de la conservación de las fuentes hídricas. Basado en la zonificación del uso actual de la subcuenca y las lecturas mensuales de parámetros físico-químicos realizados entre julio 2012 a junio 2013 se determinó la calidad del agua del Río Túnico como respuesta al uso del suelo mediante regresión logística, utilizando como valores máximos permisibles, los establecidos por la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce. Así también, se establecieron modelos mixtos para la predicción de variables físico-químicas, mediante regresión múltiple. Independientemente del uso del suelo el estado del N-NO_3^- en el agua drenada es considerado como deseable determinándose efecto significativo del uso del suelo sobre el contenido de fósforo total, aunque el modelo es de baja calidad si se utiliza como criterio el r^2 . No se logró establecer efecto del uso del suelo sobre N-NH_4^+ y N-NO_2^- . El estudio de variables físico-químicas permitió elaborar modelos estadísticos de naturaleza mixta con 5% de significación para predecir conductividad, total de sólidos disueltos y salinidad.

Palabras clave: contaminación hídrica, regresión logística, conservación de recursos hídricos.

ABSTRACT. The quality of surface water bodies in the subbasin of Túnico River as an expression of land use should be monitored to ensure the sustainability of agricultural ecosystems through the conservation of water sources. Based on the current land zoning and monthly water measurements of physicochemical variables conducted between July 2012 and June 2013 as response to land use, the water quality was estimated using logistic regression, according with the maximum permissible values established by the Authority for the Sustainable Management of the Lake Izabal and Río Dulce. Also, mixed models for the prediction of physicochemical variables were established by multiple regressions. The state of the N-NO_3^- in the drained water is considered desirable, regardless of land use, significant effect of land use on total phosphorus content was determined, however, the model was of low quality using as criteria the r^2 . It was not possible to establish the effect of land use on N-NH_4^+ and N-NO_2^- . The study of physicochemical variables allowed developing statistical models of mixed nature with 5% significance for predicting conductivity, total dissolved solids and salinity.

Keywords: water pollution, logistic regression, water conservation.

INTRODUCCIÓN

El uso correcto del suelo es un factor determinante para mantener la sostenibilidad de los sistemas productivos establecidos en las áreas rurales del país. sin embargo, debido a la presión que existe sobre el recurso para fines agrícolas, la expansión e intensificación de la frontera agrícola ha causado crecientes procesos de deforestación a nivel nacional (Instituto de Incidencia Ambiental, IARNA, 2003). Esto implica transformaciones del territorio, por la pérdida y reemplazo de

la vegetación natural, lo que altera el equilibrio del ciclo hidrológico, en la cuenca hidrográfica rural, lo que puede conllevar a inundaciones, aumento de los niveles de contaminación, modificación en los patrones de flujo y destrucción o degradación del ecosistema (Postel y Thompson, 2005; Wang *et al.*, 2008). Dichas actividades son cuantificadas en términos de pérdidas y traslocaciones de nutrientes hacia los cuerpos de agua, que contribuyen en gran medida a la degradación progresiva de

la calidad del agua (Thorsen *et al.*, 1996, Mertens y Lambin, 1999); lo que generar impactos significativos en las economías regionales y locales (Black y Sessay, 1997; Solecki, 2001), caso especial ocurre en los trópicos, donde esta situación se ve agravada, principalmente debido a la gran biodiversidad que existe en los bosques y al rol que juega en el balance ecológico regional y mundial (Reid, 1998; Bocco *et al.*, 2001;). Algunos autores proponen la reducción del conflicto del uso de la tierra, mediante un ordenamiento en función de la capacidad de uso de la tierra, que promulga prácticas de conservación de suelo y agua para reducir escorrentía y arrastre de contaminantes a los cuerpos de agua (Ramirez *et al.*, 2008). La sub-cuenca del Río Túnico, Izabal, Guatemala presenta sobre-uso del suelo en 26,53%, uso correcto en 68,31% y el resto se encuentra en sub-uso. Es importante mencionar que en la parte alta se encuentra el área protegida de la Sierra Santa Cruz y que el área con sobre-uso la constituye en su mayoría la parte media de la cuenca, donde se está perdiendo rápidamente la calidad de los suelos, afectando la parte baja por fuertes escorrentías y acarreo de sedimentos (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, MARN, 2007) lo que contribuye a contaminar las aguas del río afectando su calidad desde el punto de vista físico-química. Es por ello que se propone como objetivo del trabajo evaluar la calidad del agua del río Túnico, mediante el uso de métodos locales propuestos por la Autoridad para el manejo

sustentable de la Cuenca hidrográfica del lago de Izabal y Río Dulce (AMASURLI), para establecer relaciones estadísticas que permitan la predicción de la misma mediante variables físico-químicas como respuesta del uso del suelo.

MÉTODOS

La sub cuenca del Río Túnico forma parte de la red hídrica del Lago de Izabal, su ubicación geográfica se encuentra a los 15°38' 23" de latitud y 89° 12' 45" de longitud, comprende los municipios de Livingston y El Estor ambos del departamento de Izabal. Tiene una extensión territorial de 112,49 km², limita al Norte con la sub cuenca Sumach (Livingston); al Sur con las sub cuencas Agua Caliente y Cagüijá (El Estor); al Este con las sub cuencas Sumach y La Pita; y al Oeste con la sub cuenca El Sauce (El Estor). El Túnico tiene una cobertura en el municipio de Livingston de 35,19 km² (31,28%) y en el municipio de El Estor de 77,29 km² (68,70%), siendo este río el tributario principal de la cuenca del Lago de Izabal-Río Dulce. La parte alta de la sub cuenca se encuentra entre los 1 000-700 msnm; la parte media entre los 600-200 msnm y la parte baja entre los 100-50 msnm. Los terrenos son de topografía desde accidentada hasta plana, identificándose los usos actuales como agricultura (extensiva e intensiva), ganadería, habitacional y cobertura boscosa (Figura).

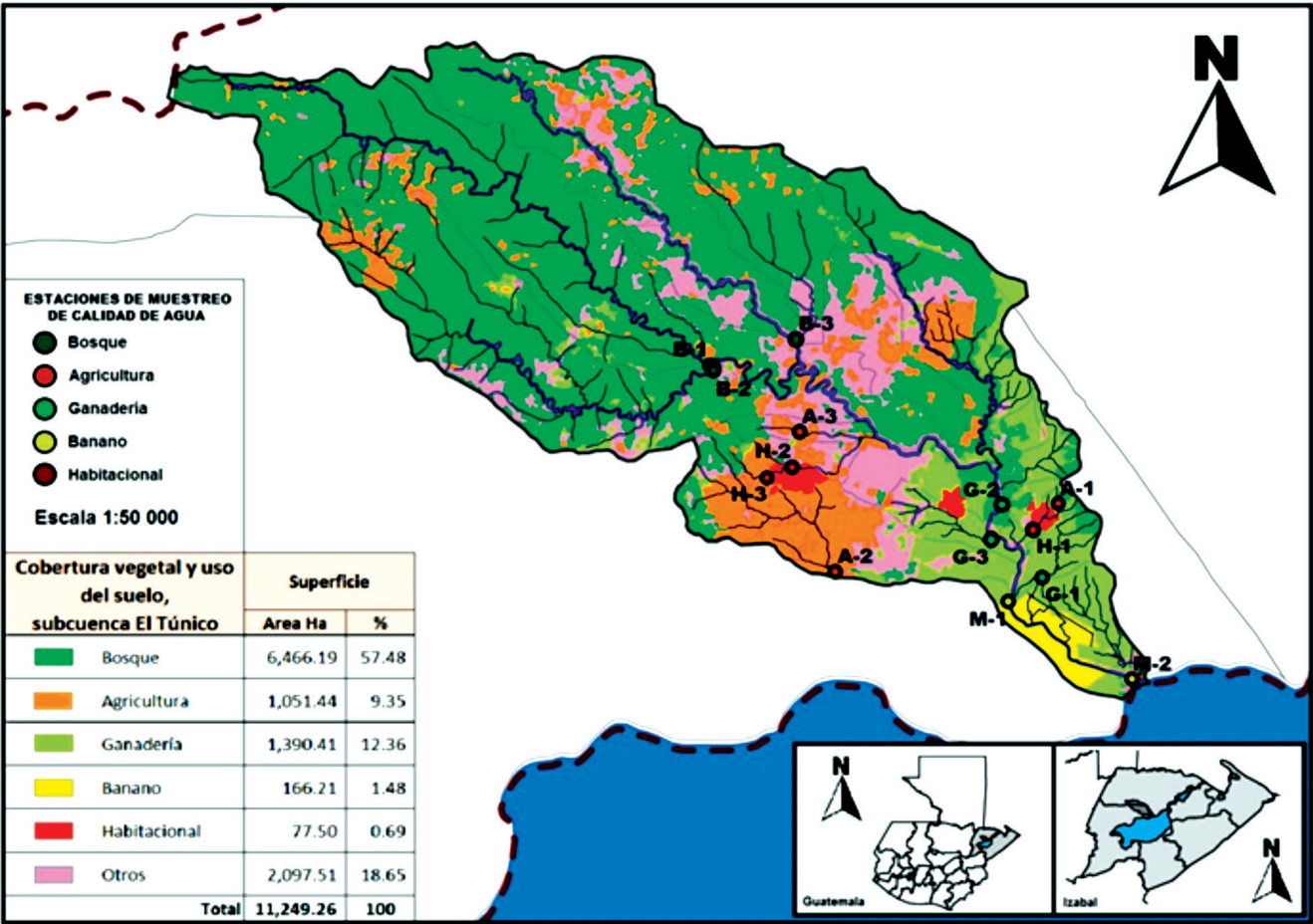


FIGURA. Subcuenca del Río Túnico y descripción de los principales usos del suelo.

Para el trabajo se utilizó la base de datos, con registros mensuales del año 2012-2013, de las aguas drenadas al Río Túnico categorizadas en función del uso del suelo de la Autoridad para el manejo sustentable de la Cuenca hidrográfica del lago de Izabal y Río Dulce (AMASURLI, 2013). Las variables respuestas fueron: pH, conductividad (S/m), total de sólidos disueltos (mg/L), salinidad (%), saturación de oxígeno disuelto (%), N-NH_4^+ (mg/L), N-NO_3^- (mg/L), N-NO_2^- (mg/L), ortofosfato (mg/L) y fósforo total (mg/L). Igualmente se determinó la temperatura al momento de coleccionar la muestra ($^{\circ}\text{C}$), el caudal (m^3/s) y la distancia del punto muestreado al punto de desembocadura en el lago de Izabal (km).

Para evaluar la calidad del agua mediante variables físico-químicas se realizó un análisis de regresión logística para las variables respuesta amonio, fósforo total, nitratos y nitritos, de conformidad con las categorías de estado deseable o indeseable, según los límites máximos permisibles establecidos por La Agenda de Conservación de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce (MARN, 2006) según Tabla 1. El modelo de regresión tiene como variable dependiente el estado indeseado de la variable respuesta P (Y) y como variables independientes dos cualitativas: estación y tipo de uso del suelo y tres cuantitativas: distancia a la desembocadura, temperatura del agua al momento del muestreo y caudal en el punto y momento de muestreo. Para el análisis se utilizó el procedimiento "Logistic" del programa estadístico mencionado, que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de la variable dependiente.

$$P(Y) = 1 / (1 + \exp(-(E_i + F_j + G_k + H_{cl} + I_{dm})))$$

P (Y) = Estado indeseable de la variable dependiente;

E_i = Efecto de uso del suelo;

F_j = Efecto de época lluviosa;

G_k = Covariable de temperatura;

H_{cl} = Covariable de caudal;

I_{dm} = Covariable de distancia al punto de desembocadura en el lago.

TABLA 1. Límites máximos permisibles para la preservación de la calidad del agua en ríos

No.	Indicador	Indeseado	Deseado
1	Amonio	> 0,07 mg/L	< = 0,06 mg/L
2	Fosforo total	> = 0,1 mg/L	< 0,1 mg/L
3	Nitratos	> 5 mg/L	< = 5 mg/L
4	Nitritos	> 0,002 mg/L	< = 0,002 mg/L

Fuente: MARN (2006).

Para estudiar el efecto del uso del suelo sobre la calidad del agua en el Río Túnico, con los resultados de las variables físico-químicas de las aguas que drenan hacia el río se realizó un análisis inferencial para comparar los valores promedio de las variables de interés de los grupos definidos por la estación (seca o lluviosa) y el tipo de uso del suelo (bosque, agricultura limpia, ganadería y cultivo del banano). El análisis se realizó utilizando la técnica de modelos mixtos, mediante el procedimiento "Mixed" del programa Statistical Analysis System SAS, versión 9.3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El N-NO_3^- no fue objeto de estudio, pues su valor máximo para el período estudiado fue menor que 5 mg/L (Límite máximo permisible), por lo que todos los valores se encuentran en el estado deseado, lo que implica que los diferentes usos del suelo, por en cuanto, no contribuyen con cargas contaminantes de nitrógeno que pudiera resultar en procesos de eutrofización. El modelo de regresión logística para el estado indeseado de las otras formas inorgánicas del nitrógeno mostró que el uso del suelo no presentó efecto significativo sobre el N-NH_4^+ y el N-NO_2^- , solo sobre el fósforo total, no obstante, los modelos son de baja calidad tomando como criterio el coeficiente de determinación, la Tabla 2 sintetiza la información generada con 5% de significación.

TABLA 2. Análisis logístico de variables físico y químicas de calidad del agua drenada al Río Túnico, con 5% de significancia

Variable	Intercepto	Efecto uso del suelo	Intercepto	Efecto época lluviosa	Intercepto	Efecto de distancia	Intercepto	Efecto Temperatura	Intercepto	Efecto de caudal	Intercepto	R ²
N-NH_4^+	13,6999	Sin efecto		Con efecto	0,3984	Sin efecto		Con efecto	-0,488	Sin efecto		0,18
Fósforo total	-1,7417	Agrícola	-0,4238	Sin efecto		Con efecto	0,3608	Sin efecto		Con efecto	0,2190	0,15
		limpia				Con efecto	0,3608	Sin efecto		Con efecto	0,2190	0,15
		Ganadería	0,5818	Sin efecto		Con efecto	0,3608	Sin efecto		Con efecto	0,2190	0,15
		Habitacional	-1,1671	Sin efecto		Con efecto	0,3608	Sin efecto		Con efecto	0,2190	0,15
		Banano	2,1565	Sin efecto		Con efecto	0,3608	Sin efecto		Con efecto	0,2190	0,15
N-NO_2^-	13,7014	Sin efecto		Con efecto	-1,4850	Sin efecto		Con efecto	0,2355	Sin efecto		0,38

Como producto del análisis inferencial de las variables físico-químicas del agua que drena hacia el Río Túnico, se determinó un efecto estadísticamente significativo al 5% de uso del suelo, época (seca o lluviosa), distancia, caudal, y temperatura al momento de colecta de las muestras (Tabla 3). Pudo determinarse que no existe efecto del uso del suelo sobre el pH y los iones N-NH_4^+ y N-NO_3^- , y sí sobre la conductividad eléctrica y el total de sólidos disueltos. La época lluviosa tuvo efectos sobre el pH, conductividad eléctrica, el total de sólidos disueltos y los iones N-NO_3^- , la distancia influyó sobre la conductividad eléctrica,

el total de sólidos disueltos, salinidad y fósforo orgánico, la temperatura lo hizo sobre el pH, $N-NH_4^+$ y $N-NO_2^-$ y el caudal solo sobre la conductividad eléctrica, salinidad y fósforo total. Teniendo como base esta información se pudieron generar modelos mixtos para predecir o elaborar hipótesis sobre cada una de las variables en estudio con efecto de por lo menos de uno de los factores evaluados, siendo los modelos independientes para cada uso del suelo y época.

Se obtuvo el siguiente modelo:

$$y_{ijklmn} = \mu + D_i + T_j + C_k + E_l + U_m + M_n + \epsilon_{ijklmn}$$

donde:

y_{ijklmn} -valor de la variable dependiente medida a la i distancia de la desembocadura, con la j temperatura y el k caudal, correspondiente a la l estación, el m tipo de uso del suelo y al n punto de muestreo;

μ - efecto común a todas las observaciones;

D_i - covariable, distancia del punto de muestreo a la desembocadura;

T_j - covariable, temperatura del agua en el momento del muestreo;
 C_k - covariable, caudal en el punto y momento del muestreo;
 E_l^k - efecto fijo de la estación en la que se realizó el muestreo
 U_m - efecto fijo del tipo de uso del suelo asociado al punto de muestreo;

M_n - efecto aleatorio del punto de muestreo dentro de la estación y el tipo de uso;

ϵ_{ijklmn} - error aleatorio.

Los modelos con mayor coeficiente de determinación al 5% de significación fueron: Conductividad ($r^2=0,78$), total de sólidos en suspensión ($r^2=0,74$) y salinidad ($r^2=0,69$), existiendo una alta correlación entre conductividad y salinidad ($r=0,94$). Con base en lo anterior, de conformidad con los métodos utilizados y el estado de desarrollo tecnológico de las actividades urbanas y agropecuarias desarrolladas en la subcuenca se infiere que actualmente la calidad del agua del Río Túnico no está siendo contaminada en niveles significantes, investigaciones futuras podrán evaluar el efecto del uso del suelo sobre la calidad del agua a través de indicadores de contaminación del agua (Ramírez, 1998; Samboni, *et al.*, 2007)

TABLA 3. Síntesis de análisis inferencial de variables físico-químicas del agua que drena al Río Túnico

Variable	Término independiente	Efecto de uso	Coeficiente	Efecto de Época lluviosa	Coeficiente	Efecto de Distancia	Coeficiente	Efecto de temperatura	Coeficiente	Efecto de caudal	Coeficiente	R ²
pH	4,33934	Sin efecto		Con efecto	-0,75845	Sin efecto		Con efecto	0,15897	Sin efecto		0,12
Conductividad	274,43626	Con efecto		Con efecto	-33,57845	Con efecto		Sin efecto		Con efecto		0,78
		Bosque	501,73949				-61,2415				-13,3401	
		Agrícola limpia	488,36366				-61,2415				-13,3401	
		Ganadería	494,62314				-61,2415				-13,3401	
		Habitacional	458,83546				-61,2415				-13,3401	
Total de sólidos disueltos	0,31646	Con efecto		Con efecto	-0,07554	Con efecto	-0,04426	Sin efecto		Sin efecto		0,74
		Bosque	0,352549				-0,04427					
		Agrícola limpia	0,349170				-0,04427					
		Ganadería	0,351405				-0,04427					
		Habitacional	0,329873				-0,04427					
Salinidad	0,081516	Con efecto		Sin efecto		Con efecto		Sin efecto		Con efecto		0,69
		Bosque	0,26060				-0,03102				-0,00591	
		Agrícola limpia	0,24345				-0,03102				-0,00591	
		Ganadería	0,24990				-0,03102				-0,00591	
		Habitacional	0,24008				-0,03102				-0,00591	
Ortofosfatos	10,93202	Con efecto		Sin efecto		Sin efecto		Sin efecto		Sin efecto		0,08
		Bosque	-16,77111									
		Agrícola limpia	-12,89663									
		Ganadería	-14,50133									
		Habitacional	-15,8468									
% Oxígeno disuelto	146,22040	Con efecto		Sin efecto		Sin efecto		Sin efecto		Sin efecto		0,21
		Bosque	-44,74840									
		Agrícola limpia	-37,66271									
		Ganadería	-44,39591									
		Habitacional	-57,60559									
NH4	-0,80895	Sin efecto		Sin efecto		Sin efecto		Con efecto	0,03685	Sin efecto		0,12
NO3	0,567564	Sin efecto		Con efecto	0,16317	Sin efecto		Sin efecto		Sin efecto		0,14
NO2	-0,03021	Con efecto		Sin efecto		Sin efecto		Con efecto	0,001501	Sin efecto		0,21
		Bosque	0,001782									
		Agrícola Limpia	0,000454									
		Ganadería	0,004940									
		Habitacional	0,010433									

Variable	Término independiente	Efecto de uso	Coficiente	Efecto de Época lluviosa	Coficiente	Efecto de Distancia	Coficiente	Efecto de temperatura	Coficiente	Efecto de caudal	Coficiente	R ²
Fósforo orgánico	-0,017615	Con efecto		Sin efecto		Con efecto		Sin efecto		Sin efecto		
		Bosque	0,124255				-0,13207					
		Agrícola limpia	0,085526				-0,13207					
		Ganadería	0,054259				-0,13207					
		Habitacional	0,155936				-0,13207					
Fósforo total	-0,49326	Con efecto		Sin efecto		Sin efecto		Sin efecto		Con efecto		0,26
		Bosque	0,44750								0,06774	
		Agrícola limpia	0,21229								0,06774	
		Ganadería	0,22360								0,06774	
		Habitacional	0,41895								0,06774	

CONCLUSIONES

- El estado de la calidad del agua drenadas al río Túnico es indeseado excepto para las concentraciones del N-NO₃⁻ independientemente del uso del suelo, pues las concentraciones reportadas son menores al máximo permisible.
- Los modelos estadísticos generados a través del análisis

inferencial con 5% de significación, sobre las variables físico-químicas del agua drenada al Río Túnico, permiten la predicción de la conductividad eléctrica, total de sólidos disueltos y salinidad.

- El uso del suelo afecta significativamente la calidad del agua en lo que respecta a la concentración del fósforo total, no así para el amonio y el nitrato.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMASURLI: *Base de datos, serie del año julio 2012- junio 2013. Aguas drenadas al Río Túnico, en función del uso del suelo*, Ed. Laboratorio de calidad de agua, Río Dulce, Izabal, Guatemala, 2013.
- BLACK, R. & SESSAY, M.: "Forced migration, land-use change and political economy in the forest region of Guinea", *African Affair*, (96): 587-605, 1997.
- BOCCO, G., MENDOZA, M. & VELÁZQUEZ, A.: "Remote Sensing and GIS-based regional geomorphological mapping-a tool for land use planning in developing countries", *Geomorphology*, (139): 211-219, 2001.
- IARNA: *Estado actual de los bosques en Guatemala*, 68pp., Ed. Instituto de Incidencia Ambiental Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Guatemala, 2003.
- MARN: *Agenda de Conservación de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce, Guatemala*. 45pp., Ed. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce (AMASURLI), Fundación Defensores de la Naturaleza (FDN), The Natural Conservancy (TNC), Guatemala, 2006.
- MARN: *Plan de Acción Integrado de la Cuenca del Lago de Izabal, Río Dulce, Guatemala*. 76pp., Ed. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce (AMASURLI), Guatemala, 2007.
- MERTENS, B. & LAMBIN, E.: "Modelling land cover dynamics: integration of fine-scale land cover data with landscape attributes". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, JAG, 1(1): 48-52, 1999.
- POSTEL, S. & THOMPSON, B.: "Watershed protection: capturing the benefits of nature's water supply services", *Natural Recourses Forum*, (29): 98-108, 2005
- RAMÍREZ, A., RESTREPO, R. y VIÑA, G.: "Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales, Formulación y Aplicación", *Ciencia, Tecnología y Futuro* 1(3): 135-153, 1998.
- RAMÍREZ, L., ALVARADO, A., PUJOL, R., BRENES, L.: "Caracterización física de la Cuenca media del Río Reventado, Cartago, Costa Rica", *Agronomía Costarricense*, 32(2): 73-92, 2008.
- REID, W.: "Biodiversity hotspots", *Trends in Ecology and Evolution*, (13):1-9, 1998.
- SOLECKI, W.: "The role of global-to-local linkages in land use/land cover change in South Florida", *Ecological Economics*, (37): 339-359, 2001.
- SAMBONI, N., CARVAJAL, Y., y ESCOBAR, L.: "Parámetros físicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua, estado del arte", *Ingeniería e Investigación* 27(3): 172-181, 2007.
- THORSEN, M., FEYEN, H. & STYCZEN, M.: "Agrochemical modeling". pp. 121-141, En: *Distributed hydrological modeling*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1996.
- WANG, X., ZHENG, D., SHEN, Y.: "Land use change and its driving forces on the Tibetan Plateau during 1990-2000", *Catena*, (72): 56-66, 2008.

Recibido: 31 de agosto de 2013.

Aprobado: 20 de marzo de 2014.

José Robledo, Ingeniero Agrónomo, Profesor, Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Izabal, Guatemala, Tel. (502) 42126338, Correo electrónico: jrobledeh@yahoo.com.