

**Evaluación de la exportación de sólidos y
nutrientes de dos tributarios en la
microcuenca Santa Inés, Honduras**

Ismari Madaí González García

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2015

ZAMORANO
CARRERA DE INGENIERÍA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación de la exportación de sólidos y nutrientes de dos tributarios en la microcuenca Santa Inés, Honduras

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Ismari Madaí González García

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2015

Evaluación de la exportación de sólidos y nutrientes de dos tributarios en la microcuenca Santa Inés, Honduras

Presentado por:

Ismari Madaí González García

Aprobado:

Erika Tenorio, M.Sc.
Asesora Principal

Laura Suazo, Ph.D.
Directora
Departamento de Ingeniería en
Ambiente y Desarrollo

Victoria Cortés, M.Sc.
Asesora

Raúl Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

**Evaluación de la exportación de sólidos y nutrientes de dos tributarios en la
microcuenca Santa Inés, Honduras
Ismari Madaí González García**

Resumen. Las zonas montañosas son importantes para la recarga hídrica de las cuencas hidrográficas y el abastecimiento de agua para las poblaciones. Se analizaron dos tributarios de la microcuenca Santa Inés: El Guayabo y Los Anteojos. Los objetivos fueron comparar parámetros de calidad de agua, cuantificar las cantidades de sólidos y nutrientes exportados e identificar el impacto del uso y cobertura de suelos y red vial en estos parámetros. Se aforó continuamente con vertederos y las muestras se colectaron diariamente durante junio y julio, 2015. Se analizaron los sólidos totales, los sólidos disueltos, conductividad eléctrica, turbiedad, nitratos y fosfatos. Se estimó la carga exportada en función del caudal promedio diario. Mediante la prueba no paramétrica de Mann-Withney se compararon los parámetros estudiados entre ambas microcuencas. Las concentraciones y cargas exportadas aumentaron tras eventos de precipitación >30 mm. El Guayabo exportó 8 tn/km^2 de sólidos totales, 2.3 tn/km^2 de sólidos disueltos, 22 kg/km^2 de fosfatos y 14 kg/km^2 de nitratos. La microcuenca de Los Anteojos exportó 5 tn/km^2 , 1.5 tn/km^2 , 13 kg/km^2 y 15 kg/km^2 respectivamente. Las concentraciones fueron consistentemente mayores en Los Anteojos y con excepción de los nitratos, los parámetros fueron significativamente diferentes entre ambas microcuencas. Las cargas exportadas fueron mayores en El Guayabo. Es decir que factores como la pendiente, usos y coberturas, suelos y red vial pudieron influir sobre la calidad del agua, pero no en la exportación de sólidos y nutrientes que se relacionan con el caudal específico.

Palabras clave: Conductividad eléctrica, fosfatos, sólidos disueltos, sólidos totales, nitratos, turbiedad.

Abstract: The mountainous areas are important for water recharge and water supply for populations. Two tributaries of the watershed Santa Ines were analyzed: El Guayabo and Los Anteojos. The objectives were to compare quality parameters, to estimate the amounts exported of solid and nutrients and to identify the impact of land use and coverage, soils and roads on these parameters. Daily samples were collected from weirs in June – July, 2015. We analyzed total solids, total dissolved solids, conductivity, turbidity, nitrates and phosphates. Export was estimated based on the average daily flow. Using a non-parametric Mann-Whitney test parameters studied they were compared between the watersheds. Concentrations and exported loads increased after rainfall events >30 mm. El Guayabo exported 8 tons/km^2 of total solids, 2.3 tons/km^2 of total dissolved solids, 22 kg/km^2 phosphate and 14 kg/km^2 of nitrates. Los Anteojos exported 5 tons/km^2 , 1.5 tn/km^2 , 13 kg/km^2 and 15 kg / km^2 respectively. The concentrations were higher in Los Anteojos and all of the parameters studied, except for nitrates were significantly different. Exported loads were higher in El Guayabo. Factors such as slope, land use and coverage, soils and roads

can influence water quality, but not the export of solids and nutrients that are related to the specific flow.

Key words: Conductivity, dissolved solids, nitrates, phosphates, total solids, turbidity.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	8
4. CONCLUSIONES	18
5. RECOMENDACIONES	19
6. LITERATURA CITADA.....	20
7. ANEXOS	24

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Métodos para medir parámetros de calidad de agua y nutrientes.....	7
2. Caracterización morfométrica de las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos	8
3. Resultados de la comparación de las microcuencas	17

Figuras	Página
1. Mapa de ubicación y red vial de las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos..	4
2. Mapa de localización de puntos de aforo y pluviómetros en las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos.....	5
3. Precipitación y caudal promedio diario de las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos.....	9
4. Mapa de usos y cobertura de las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos	10
5. Mapa de suelos de las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos	11
6. Concentración de sólidos totales de los tributarios El Guayabo y Los Anteojos..	12
7. Turbiedad diaria de los tributarios El Guayabo y Los Anteojos	12
8. Conductividad eléctrica diaria de los tributarios El Guayabo y Los Anteojos	13
9. Concentración de sólidos totales disueltos de El Guayabo y Los Anteojos.....	14
10. Concentración diaria de nitratos de los tributarios El Guayabo y Los Anteojos ..	14
11. Concentración diaria de fosfatos de los tributarios El Guayabo y Los Anteojos..	15
12. Exportación diaria de sólidos totales disueltos de la microcuenca El Guayabo ...	15
13. Exportación diaria de sólidos totales disueltos de la microcuenca Los Anteojos .	16
14. Exportación diaria de nitratos de la microcuenca El Guayabo	16
15. Exportación diaria de nitratos de la microcuenca Los Anteojos	17

Anexos	Página
1. Exportación diaria de sólidos totales de El Guayabo y Los Anteojos.....	24
2. Exportación diaria de fosfatos de las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos..	25

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas montañosas son importantes para la recarga hídrica de las cuencas hidrográficas. Los ecosistemas montañosos cumplen una función vital en el desarrollo de las sociedades, puesto que las zonas de recarga son las que permiten la incorporación del agua hacia los acuíferos que sustentan las poblaciones. Estos ecosistemas además de proveer servicios ambientales como la disponibilidad de agua, son un sistema de almacenamiento de nutrientes contenidos en los suelos (Matus *et al.* 2009).

Los nutrientes no permanecen en un solo punto del ecosistema, pues cumplen un ciclo natural en el que se mueven para mantener la estabilidad del sistema (Bosco *et al.* 2004). El ciclo de los nutrientes está estrechamente relacionado con los procesos edafológicos (Gallardo *et al.* 2009). Para que los nutrientes fluyan en un sistema hídrico es importante la ocurrencia de dos procesos: la erosión del suelo y la exportación de los mismos mediante la dilución y el arrastre.

La erosión es un proceso natural que ocurre en los ecosistemas y depende de algunos factores como la pendiente, los patrones climáticos, uso y cobertura del suelo. Este proceso es acelerado por la intervención antropogénica. Otro factor que incide en la erosión son los taludes de carreteras que se ubican en pendientes elevadas y poca cobertura vegetal (Tormo *et al.* 2009). Las actividades humanas alteran el equilibrio de los ecosistemas y provocan la erosión del suelo. La erosión incrementa en todo el planeta cada año, pues se estima que cada año se pierden entre 5 a 7 millones de hectáreas de tierras cultivables por erosión. La erosión es mayor en los suelos de laderas donde se practica agricultura sin medidas de conservación (Frers 2009). Esto se relaciona con la reducción de la productividad y otros costos económicos, también combinados con desastres naturales como los derrumbes y arrastre de suelo (Buckles 1999).

El acelerado crecimiento de la población a nivel mundial ha contribuido a que se ejerza mayor presión sobre los ecosistemas. El concepto de desarrollo de la población está relacionado con la degradación del medio ambiente (Borrego y Hernández 2014). La explotación de los recursos naturales ligada a la necesidad de producir alimentos y otros servicios, son las causas de la degradación ambiental y del suelo.

La alteración del uso y cobertura afecta directamente el comportamiento de una cuenca hidrográfica. Eliminar la cobertura vegetal deja desprotegido el suelo y a su vez provoca que la escorrentía en épocas lluviosas acelere el proceso de erosión hídrica (Castro 2013). Parte de la lámina de suelo que se erosiona en una cuenca por influencia de la pendiente llega hasta el río. Una vez que el suelo erosionado llega a los afluentes se encuentra de dos formas, como sólidos suspendidos y disueltos (Sala y Farguell 2002). Los sólidos

suspendidos y los disueltos contienen nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes son los más usados en la agricultura. A través de la fertilización se ponen disponibles a los cultivos para suplir sus requerimientos. Sin embargo, la falta de obras de conservación y cobertura vegetal ocasiona que la escorrentía transporte los nutrientes y que los suelos pierdan fertilidad (Arroyave *et al.* 2012).

El nitrógeno es fundamental en todas las formas de vida. A diferencia de los otros elementos importantes, éste no puede ser utilizado en su forma natural de gas (Vitousek *et al.* 1997). El nitrógeno es más soluble que el fósforo; basta con tener precipitaciones para que éste sea convertido en un compuesto que esté disponible y llegue al afluyente por escorrentía. Este fenómeno se da principalmente en sitios de uso ganadero o agrícola. Se espera que una microcuenca de uso forestal exporte menos sedimentos y nutrientes que una de uso agropecuario (Oyarzun *et al.* 1997).

El fósforo es un nutriente muy importante en las primeras etapas de desarrollo de los cultivos (Brito y Hack 2005). La erosión es el factor principal de pérdida de fósforo porque es poco soluble y para que llegue al cuerpo de agua necesita ser transportado por el arrastre de sedimentos (Camas *et al.* 2012). La presencia de fósforo en aguas de escorrentía puede provenir de suelos agrícolas o un sitio puntual de contaminación, pues indica el uso de fertilizantes químicos en exceso cuando superan cantidades de 30 kg/ha (Woli *et al.* 2008).

Los nutrientes son transportados en las corrientes de agua hasta ser exportados de la cuenca. Es decir que éstos no regresan al territorio, por lo que representan una pérdida para el ecosistema. La pérdida de nitrógeno y fósforo afecta directamente a los productores de ladera. Dado que el nitrógeno y fósforo son removidos del suelo por efecto de la erosión, lo cual induce a que el productor invierta más en su producción o que no obtenga los rendimientos esperados (Kladivko *et al.* 2004). Por otra parte, la reducción de la producción conlleva a que incrementen las dosis de aplicación de fertilizantes y que estos contaminen los afluentes. La fuente de mayor aporte de nitrógeno y fósforo en un río es la agricultura (David y Gentry 2000). Por otra parte, las concentraciones de sedimentos y nutrientes son indicadores importantes para medir la calidad de agua y darle el tratamiento adecuado para ser consumida.

Al igual que muchas microcuencas en zonas forestales rurales de Honduras, la microcuenca Santa Inés, localizada en las proximidades de Zamorano, es un territorio que se encuentra sujeto a degradación de suelo por avance de la frontera agrícola. Santa Inés es la fuente de abastecimiento de agua para cinco comunidades: El Guayabo, Los Lirios, Matambre, Santa Inés y Santa Rosa. Además, la microcuenca provee agua para riego a Zamorano y funciona como un sitio experimental de campo para fines educativos.

Conocer las condiciones de la microcuenca y su relación con la cantidad y calidad del agua es importante para Zamorano y las comunidades vecinas, ya que el establecimiento de una línea base de información permiten una visión más clara de las acciones de un plan de manejo del territorio. Esta información sirve para establecer medidas de conservación y priorizar puntos de mejora a través de proyectos desarrollados en conjunto. Eventualmente, los datos de parámetros de calidad, exportación de los sólidos y nutrientes proveen un punto de partida para actividades futuras de potabilización del agua en Zamorano.

Tener un diagnóstico sirve para definir líneas de investigación en la microcuenca. Dado que los factores climáticos en los últimos años han sido tan variables, la información de este estudio proporciona una base de comparación con futuros estudios que contribuyan al monitoreo del comportamiento de la microcuenca en una línea de tiempo.

En los últimos años se ha investigado sobre suelos y agua de la microcuenca. En 2011 se realizó un Estudio Edafológico y de Cobertura para una modelación hidrológica que permitió caracterizar Santa Inés (Acosta y Kucharsky 2012). También, se hizo una caracterización hidrológica y balance hídrico de la microcuenca, en la cual se identificaron relaciones de precipitación y caudal. Se estimó el potencial de abastecimiento poblacional (Huezo 2011).

Cuantificar la generación de escorrentía y analizar datos climatológicos e hidrológicos es una parte fundamental en el diagnóstico de la microcuenca. Estos factores contribuyen directamente en el proceso de erosión, exportación de sedimentos y nutrientes de la microcuenca. El análisis de las cantidades de sedimentos exportados permite categorizar la microcuenca de acuerdo a su potencial de exportación, lo cual a su vez permite establecer técnicas de mitigación de los sectores más vulnerables a esta exportación.

Este estudio analizó los dos principales tributarios de la microcuenca Santa Inés entre los meses de junio y julio del 2015. Los objetivos del estudio fueron i) Comparar parámetros de calidad de agua entre la quebrada El Guayabo y Los Anteojos; ii) Cuantificar los sólidos y nutrientes exportados de la microcuenca durante este periodo por área de drenaje e iii) Identificar el impacto del uso y cobertura de los suelos y la red vial en la carga de sólidos y nutrientes exportados para recomendar prioridad de manejo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se desarrolló en dos de los tributarios de la microcuenca Santa Inés: El Guayabo y Los Anteojos. Ambos se encuentran localizados entre los departamentos de Francisco Morazán y El Paraíso. La microcuenca del Guayabo tiene un área de 7.07 km² y un perímetro de 11.83 km. El rango de elevación es desde los 1080 a 1760 msnm. La microcuenca de Los Anteojos tiene 3.91 km² de área, un perímetro de 10.40 km y elevaciones desde 1080 a 1656 msnm. Ambos tributarios son de segundo orden (Horton 1945).

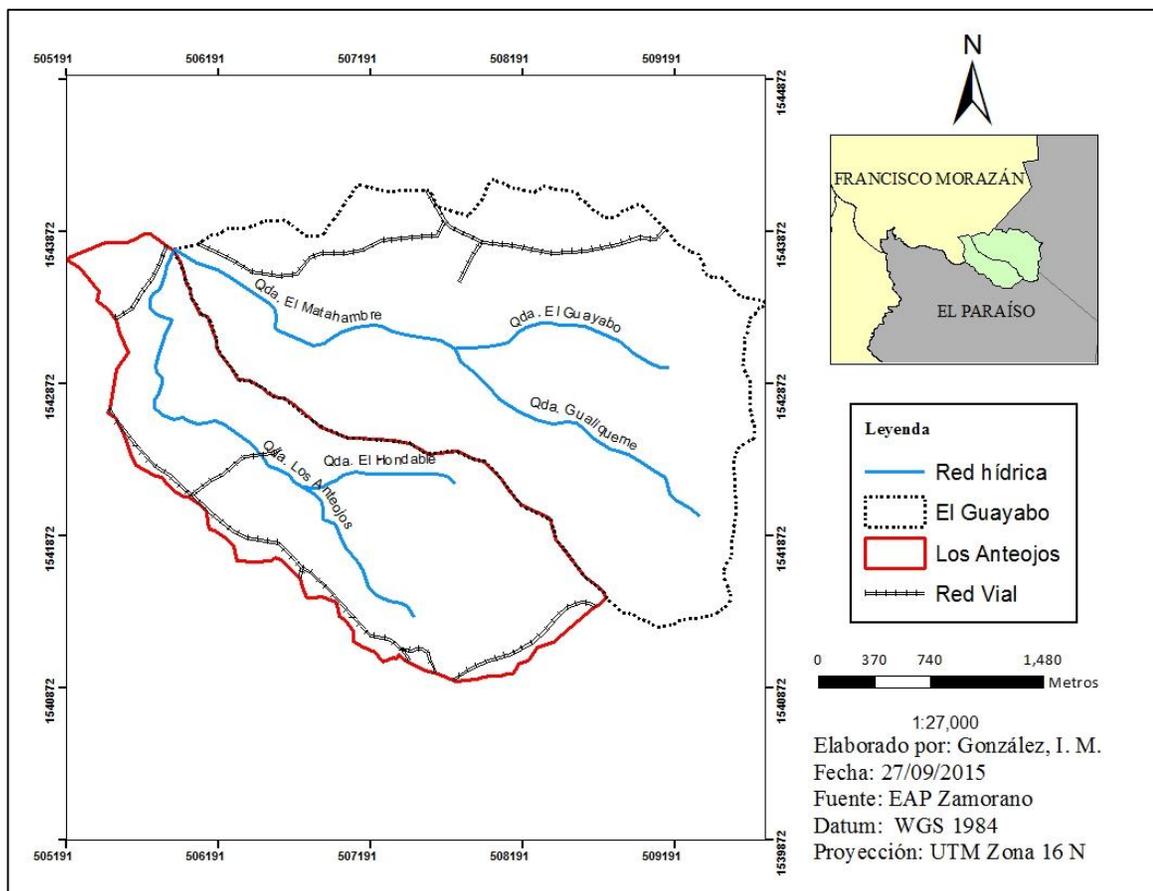


Figura 1. Mapa de ubicación y red vial de las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos

Caracterización morfométrica del sitio de estudio

Se calcularon algunos parámetros morfométricos que contribuyen a explicar el comportamiento hidrológico de la microcuenca y su relación con el arrastre de sedimentos y nutrientes de cada tributario. Se delimitó el área de ambas microcuencas utilizando la información de curvas a nivel proveídas por la Unidad de SIG Zamorano y posteriormente se estimó el área, perímetro, pendiente, índice de Gravelius y densidad de drenaje.

Estimación de caudal

Los vertederos son estructuras de aforo permanentes. Se aforó en los vertederos ubicados en El Guayabo en las coordenadas geográficas extremas UTM (509858-1541309) y (505897-1543866). Los Antejos entre las coordenadas UTM (508551-1540990) y (505045-1543784). Los tipos de vertederos construidos fueron rectangular y V-notch de 60° respectivamente (Figura 2). La altura del agua se midió con una estación limnimétrica y traductores de presión Global Water (WL16)®, para estimar el caudal a partir de las fluctuaciones de la altura del agua a cada cinco minutos. Una vez que se descargaron los datos almacenados en la memoria del sensor, se calcularon los caudales en m³/s.

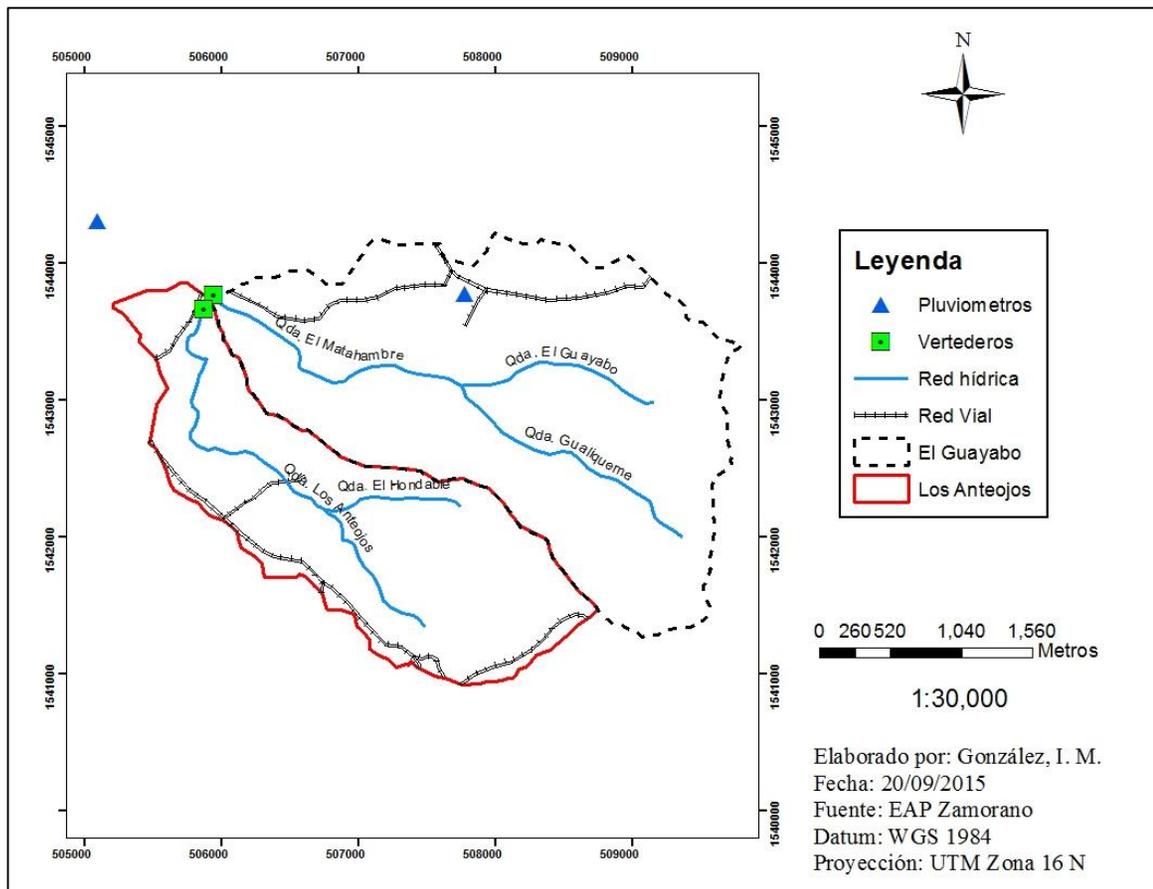


Figura 2. Mapa de localización de puntos de aforo y pluviómetros en las microcuencas El Guayabo y Los Antejos

Para calcular el caudal se aplicaron las ecuaciones según el tipo de vertedero. El factor determinante para el cálculo fue la altura de agua. Es decir, para alturas menores a 20 cm de la primera abertura del vertedero se aplicó la ecuación 1 y 3 según tipo de vertedero. Cuando las alturas superaron los 20 cm se utilizaron las ecuaciones 2 y 4, las cuales considera la suma del caudal que fluye por la primera y la segunda abertura.

Vertedero rectangular con contracciones

$$Q = C_d(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} \quad [1]$$

$$Q = C_d(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} + C_d(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} \quad [2]$$

Vertedero tipo V-notch 60°

$$Q = C_d h_2^5 \quad [3]$$

$$Q = C_d h_2^5 + C_d(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} \quad [4]$$

Donde:

- Q = Caudal que fluye por el vertedero en m³/s
- C_d = Coeficiente de descarga
- L = Longitud de la cresta del vertedero en metros
- h = Altura de la cresta en metros
- n = Número de contracciones

Cartografía del área de estudio

Se elaboró el mapa de ubicación de los sitios de monitoreo de caudal. También, el mapa de usos y coberturas basados en la información del estudio de Kucharsky (2012). La red vial y el mapa de suelos fueron considerados para analizar su influencia sobre los parámetros de calidad de agua y exportación de sólidos y nutrientes.

Recolección y análisis de muestras

Las muestras se colectaron diariamente en una botella de polietileno de alta densidad con capacidad de un litro, durante los meses de junio a julio. Las muestras se ingresaron al laboratorio cada semana donde fueron refrigeradas hasta ser analizadas mediante protocolos estandarizados (Cuadro 1).

Cuadro 1. Métodos para medir parámetros de calidad de agua y nutrientes

Parámetro	Método	Unidad	Equipo
Sólidos totales	2540-B: Total Solids Dried at 103-105°C	mg/L	Horno
Sólidos disueltos	Waterproof Multiparameter Testers	ppm	Multiparámetro
Conductividad eléctrica	Conductivimetría	µS/cm	Conductivímetro
Turbiedad	Colorimetría	UNT	Turbidímetro
Nitratos	Espectrofotometría UV	mg/L	Espectrofotometro UV
Fosfatos	8048 -Phosver3 de ácido ascórbico	mg/L	Colorímetro HACH DR/890

Fuente: APHA *et al.* (2005) y HACH Company (2004).

Estimación de la exportación de sólidos y nutrientes

Después de la medición de los caudales y las concentraciones de sólidos y nutrientes, se consideró estimar la carga exportada. Se utilizó el caudal promedio diario y la suma de las cargas diarias entre el área de cada tributario, para conocer la carga específica exportada por todo el periodo de estudio (Rivera *et al.* 1999).

$$E = \frac{\sum \frac{C \times 1000 \times Q}{10^6 mg \times 86400s}}{A} \quad [5]$$

Donde:

E = Carga exportada kg/día km²

C = Concentración mg/L

Q = Caudal promedio diario m³/s

A = Área km²

Análisis de datos

Dado que los datos con la prueba estadística Kolmogorov-Smirnov (muestra ≥ 50) no presentaron una distribución normal, se realizó una prueba no paramétrica de Mann-Whitney para muestras independientes con un nivel de confianza del 95% con el fin de comparar las microcuencas. Los datos se analizaron con el software estadístico IBM Statistics SPSS 19.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización morfométrica de los sitios de estudio demuestra que el área de la microcuenca El Guayabo es más grande que la de Los Anteojos. La diferencia de elevación máxima entre ambas microcuencas es solamente de 104 metros y la pendiente del Guayabo es aproximadamente 2% mayor que la de Los Anteojos. Ambas microcuencas son de forma ovalada, según el Índice de Gravelius. Con relación al área, la densidad de drenaje es mayor en Los Anteojos, lo cual explica que el tiempo de concentración de la quebrada Los Anteojos sea menor en relación a la otra quebrada (Tabla 2).

Parte de la caracterización del área fue la medición de las carreteras. Para El Guayabo se estimó 3.3 km de longitud y una densidad de 0.47 km/km². En Los Anteojos se estimó 4.47 km de longitud y la densidad 1.14 km/km². En los dos sitios de estudio las pendientes son fuertemente onduladas 12-50% (Tabla 2) y los taludes de las carreteras no tienen obras de conservación. La red vial en ambos sitios no tienen pavimento y el ancho es de aproximadamente 5m.

Cuadro 2. Caracterización morfométrica de las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos

Parámetro	Unidad	El Guayabo	Los Anteojos
Área	km ²	7.07	3.91
Perímetro	km	11.83	10.40
Pendiente de la cuenca	%	18.09	16.77
Índice de Gravelius	K	1.25	1.48
Densidad de drenaje	km/km ²	0.78	1.11

El estudio comprendió la evaluación de sólidos y nutrientes desde 10 de junio hasta 31 de julio. Este año la época lluviosa fue atípica, ya que el fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENSO) se declaró como uno de los episodios de intensidad más fuerte y maduro desde 1998 (OMM 2015). Dado que las condiciones climáticas no fueron normales, los resultados del estudio no reflejan un comportamiento normal bajo condiciones hidrológicas de años en que no se presentan anomalías extremas.

Previo al inicio del muestreo, la microcuenca ya tenía condiciones de humedad por las primeras tormentas de la temporada lluviosa. Sin embargo, durante el tiempo de estudio ocurrieron cuatro eventos de precipitación >30 mm (Figura 3); los cuales representan el 33% del total de precipitación de los dos meses estudiados (608 mm). Los eventos de mayor precipitación generaron caudales pico en ambos tributarios. El comportamiento fue similar en los dos tributarios, pero los caudales fueron menores en la quebrada Los Anteojos.

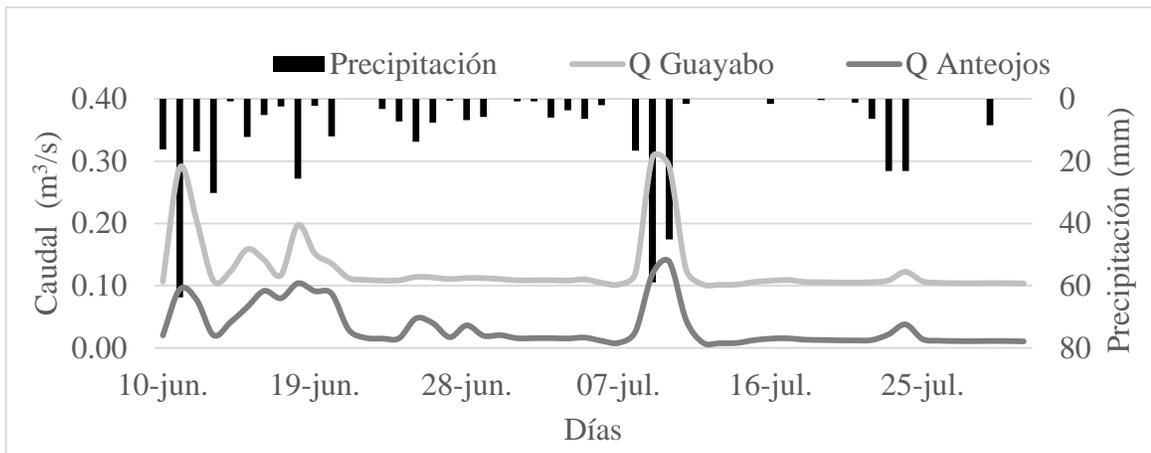


Figura 3. Precipitación y caudal promedio diario de las microcuencas El Guayabo y Los Antejos

La aportación total de agua de la microcuenca El Guayabo fue de 0.57 hectómetros cúbicos (hm^3) y la de Los Antejos fue de 0.15 hm^3 . El caudal promedio diario en la primera fue de 0.13 m^3/s mientras que en la segunda fue 0.03 m^3/s ; lo cual indica que Los Antejos tributa aproximadamente el 10% del caudal del Guayabo. Los caudales máximos registrados corresponden directamente a los días de mayor precipitación (Figura 3).

La microcuenca del Guayabo tiene 48% de bosque de coníferas, 46% de bosque latifoliado y 6% de uso agropecuario. Por otro lado, Los Antejos tiene 48%, 7% y 45% respectivamente. El bosque de coníferas es la cobertura vegetal predominante en ambas microcuencas y se encuentra en igual proporción (Figura 4). Sin embargo, el uso agropecuario es el segundo más importante en Los Antejos a diferencia del Guayabo en el que es el menos representado (Kucharsky 2012).

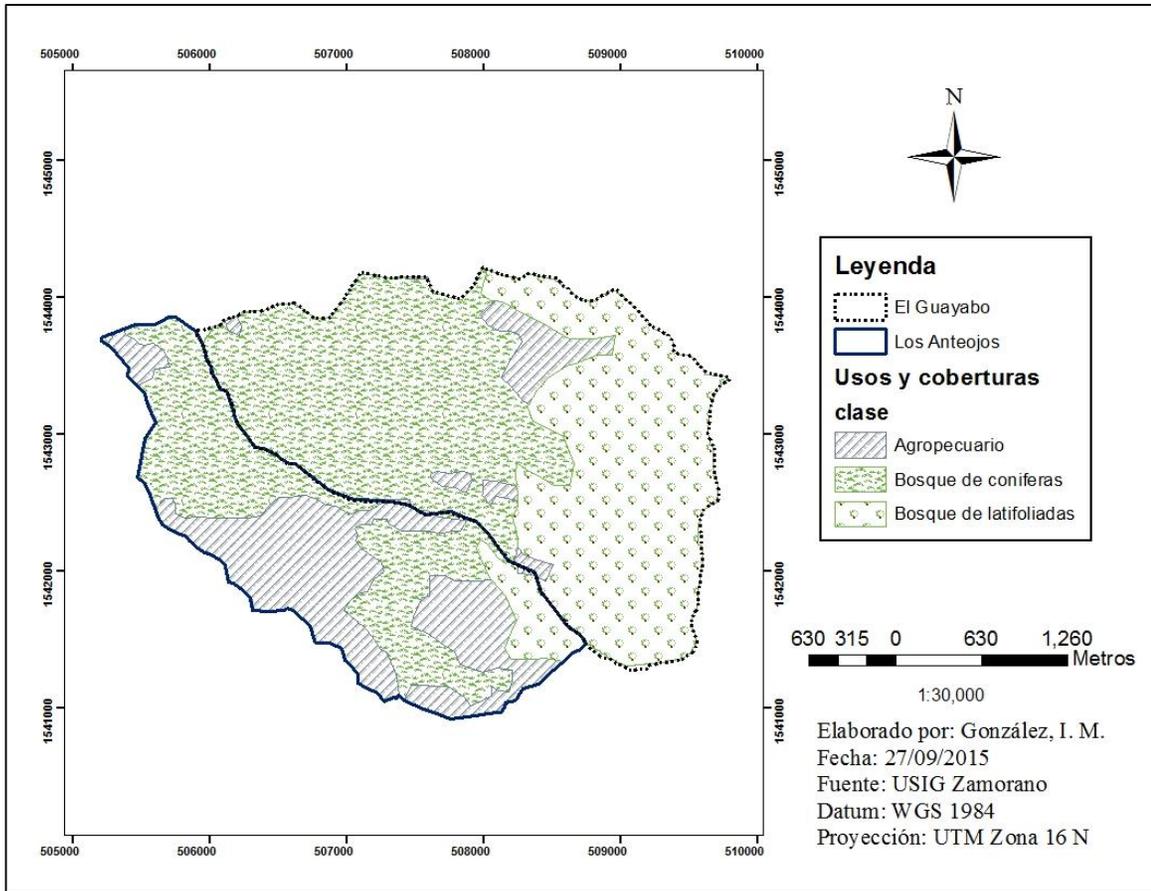


Figura 4. Mapa de usos y cobertura de las microcuencas El Guayabo y Los Antejos

Los suelos de la quebrada El Guayabo y Los Antejos están conformados por texturas gruesas (Figura 5). El Guayabo tiene 33% de textura franco arcillo arenoso, 33% arenosa franca y 21% textura arenosa. En cambio Los Antejos tiene el 44% de textura arenosa, 30 % de arenosa franca y 24% de franco arcillo arenoso (Kucharsky 2012). Los suelos francos y franco arenoso no son representativos en ambos sitios.

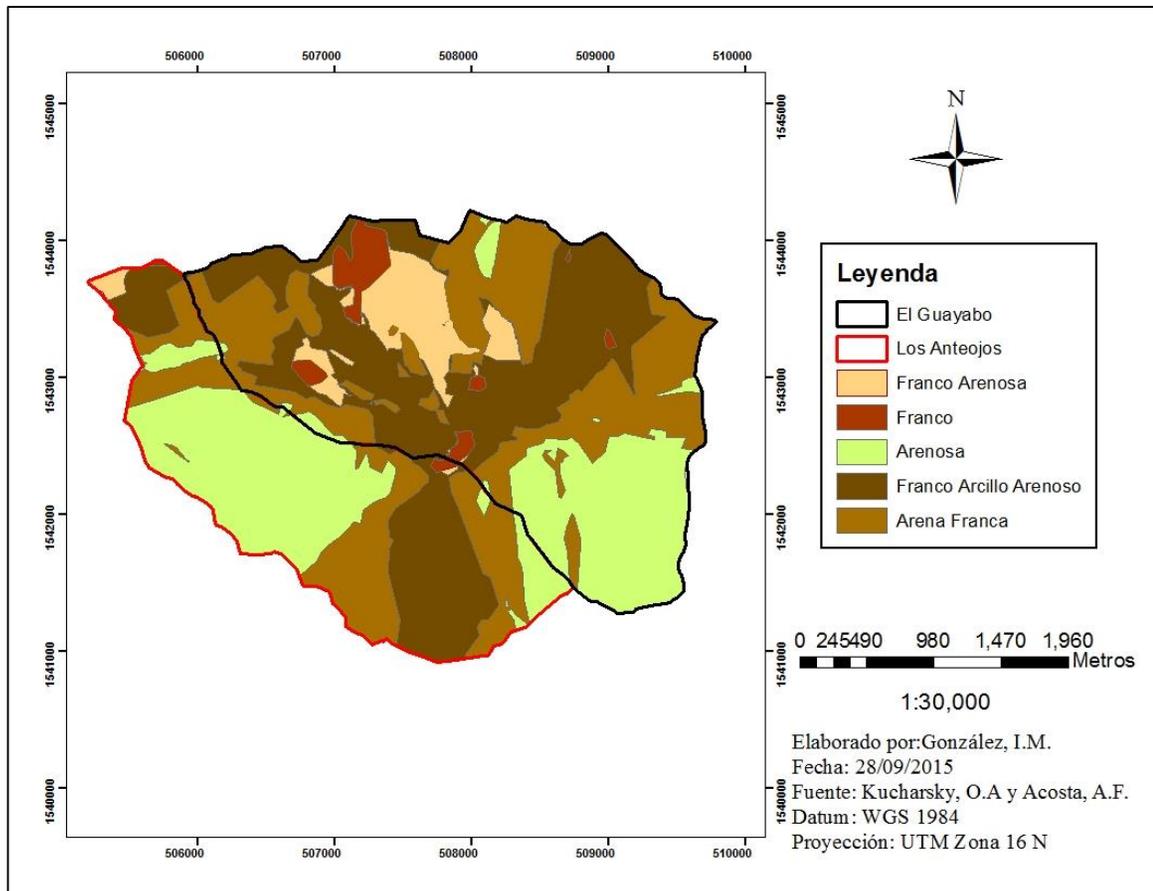


Figura 5. Mapa de suelos de las microcuencas El Guayabo y Los Antejos

Los picos de concentración de sólidos totales fueron mayores en la quebrada Los Antejos con un máximo de 257 mg/L, mientras que en El Guayabo fue de 195 mg/L. La media de la concentración de sólidos en Los Antejos fue 109 mg/L y en El Guayabo 92 mg/L. La prueba estadística U Mann-Whitney mostró que existe una diferencia significativa entre ambos tributarios ($P=0.006$). Las fechas en que se presentaron las concentraciones más altas coinciden con los días en que hubo caudales pico, tras eventos de mayor precipitación (Figura 6).

Dado que los suelos de la parte media de la microcuenca en Los Antejos son arenosos (44%), es posible que eso influya en un arrastre de sedimentos más rápido que en El Guayabo e influya sobre la concentración de sólidos totales. Adicionalmente, en Los Antejos hay mayor área destinada a la agricultura (45%) sin medidas de conservación de suelos y con aplicación de fertilizantes y plaguicidas para sostener la producción. La sustitución de la cubierta vegetal por cultivos representa una mayor producción de sedimentos, problema que se agrava en terrenos de altas pendientes (García 1997). Otro factor que puede tener influencia en estos resultados es la red vial, puesto que en Los Antejos la densidad de los caminos es 1.14 km/km², mayor que en El Guayabo de 0.47 km/km².

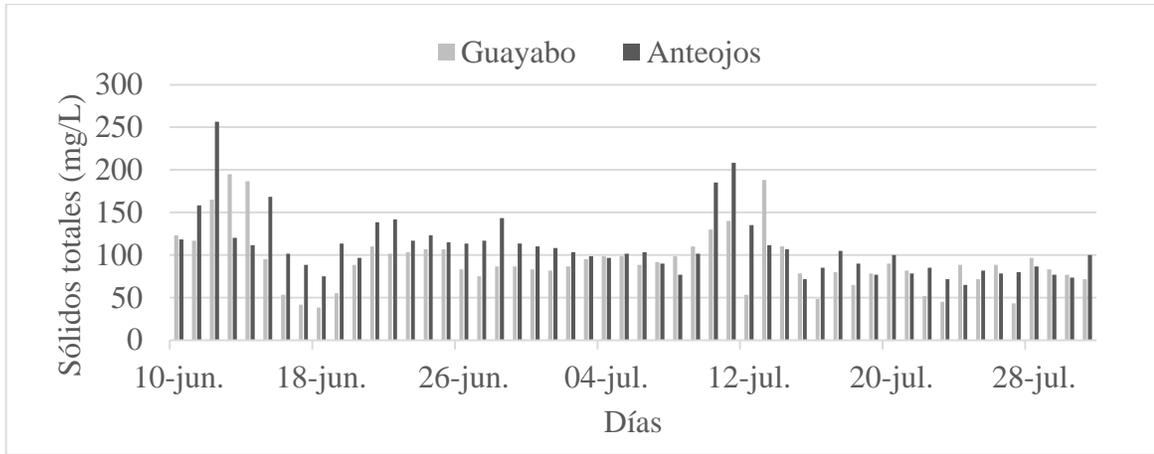


Figura 6. Concentración de sólidos totales de los tributarios El Guayabo y Los Antejos

Los valores de turbiedad en Los Antejos fueron consistentemente mayores que en El Guayabo. Los rangos fueron 11-82 Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT) para Los Antejos y 11-98 UNT para el otro tributario, siendo significativamente diferentes ($P=0.002$). Los resultados fueron similares a los encontrados en el estudio realizado en la “Quebrada Aguja” del municipio de Güinope, en las proximidades a la microcuenca Santa Inés, con una turbiedad de 29-73 UNT (Sánchez y Tercero 2010). Los picos de turbiedad observados (Figura 7), al igual que los sólidos totales, coinciden con los días en los que ocurren eventos que generaron mayor escorrentía. Existe una relación directa entre los sedimentos suspendidos y la turbiedad del agua (Meadows y Skaugset 2007; Slaets *et al.* 2014).

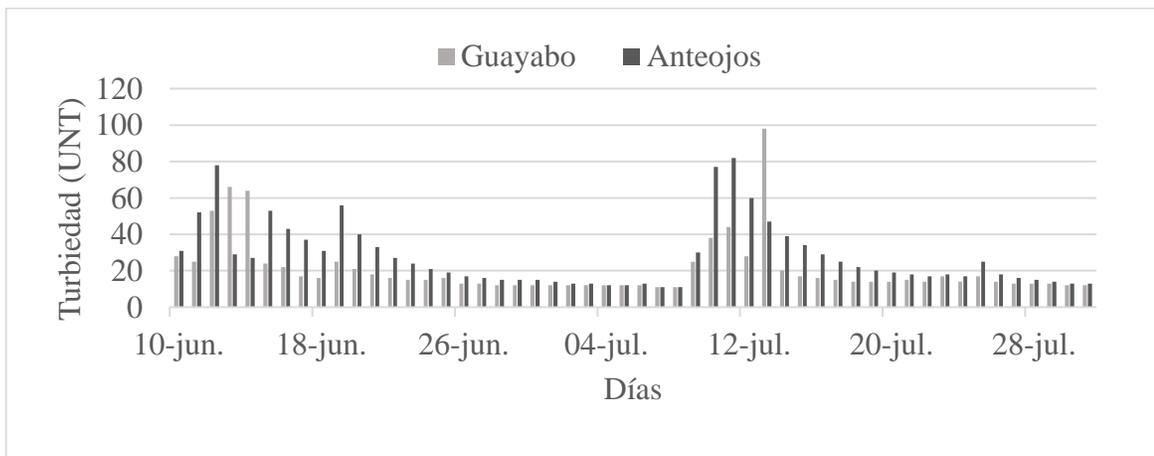


Figura 7. Turbiedad diaria de los tributarios El Guayabo y Los Antejos

La conductividad eléctrica media de Los Antejos ($50.69 \mu\text{S}/\text{cm}$) fue mayor que la de El Guayabo ($34.93 \mu\text{S}/\text{cm}$). La concentración máxima para el primer tributario fue de $75.22 \mu\text{S}/\text{cm}$ y para el segundo fue $49.96 \mu\text{S}/\text{cm}$. Por lo tanto, entre las quebradas existe una diferencia significativa ($P=0.000$). Esto indica que en Los Antejos hay mayor

conductividad eléctrica que en El Guayabo (Figura 8). Un estudio de las cuencas Juan Cojo y El Salado en Colombia, mostraron un comportamiento similar. La conductividad eléctrica encontrada alcanzó valores de 30-150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los cuales fueron considerados normales para aguas naturales, puesto que las concentraciones fueron menores a 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Gómez *et al.* 2007).

La conductividad eléctrica puede atribuirse a actividades agrícolas que aportan productos agroquímicos en dilución por arrastre a los tributarios. También, se ha demostrado que cuencas de uso forestal hay menores concentraciones de nitratos y fosfatos (Sala y Farguell 2002). Es decir que en cuencas con uso agrícola hay mayores concentraciones de nutrientes por el uso de fertilizantes (David *et al.* 1997).

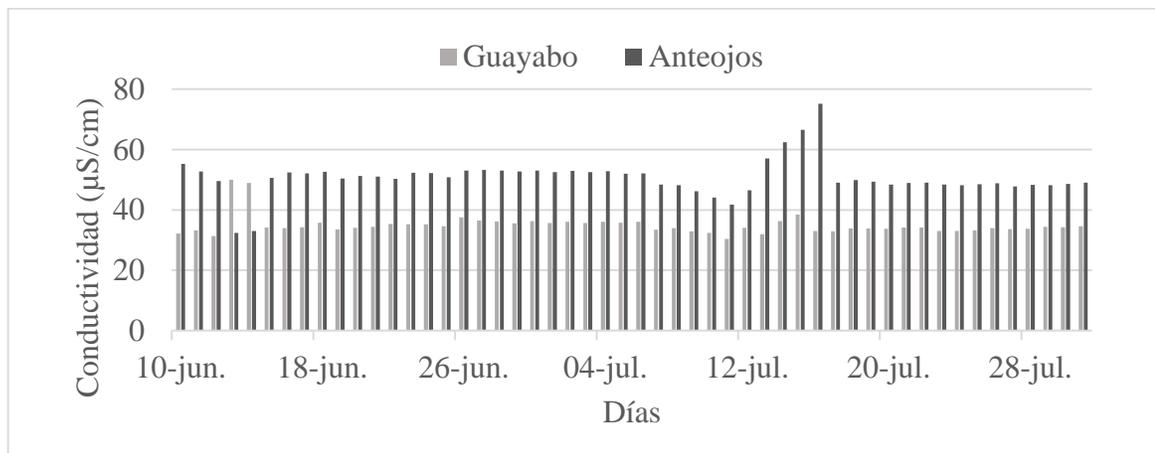


Figura 8. Conductividad eléctrica diaria de los tributarios El Guayabo y Los Antejos

El comportamiento de los sólidos totales disueltos no varió a lo largo del periodo de estudio. El rango de concentración en El Guayabo fue de 24-40 ppm, mientras que en Los Antejos fue de 24-44 ppm. Sin embargo, la media para el primero es de 29 ppm y para el segundo 40 ppm y una diferencia significativa entre ambos tributarios ($P=0.000$). Para fuentes de agua superficiales naturales varios estudios han encontrado valores desde 30 mg/L hasta 6,000 mg/L (WHO 2003). Los sólidos disueltos tienen un comportamiento similar a la conductividad eléctrica, puesto que ambos parámetros se relacionan con la presencia de sales y materia orgánica en el agua que se incrementa por prácticas agrícolas. Sin embargo, no se observó mucha variación de la concentración de sólidos por eventos de mayor precipitación.

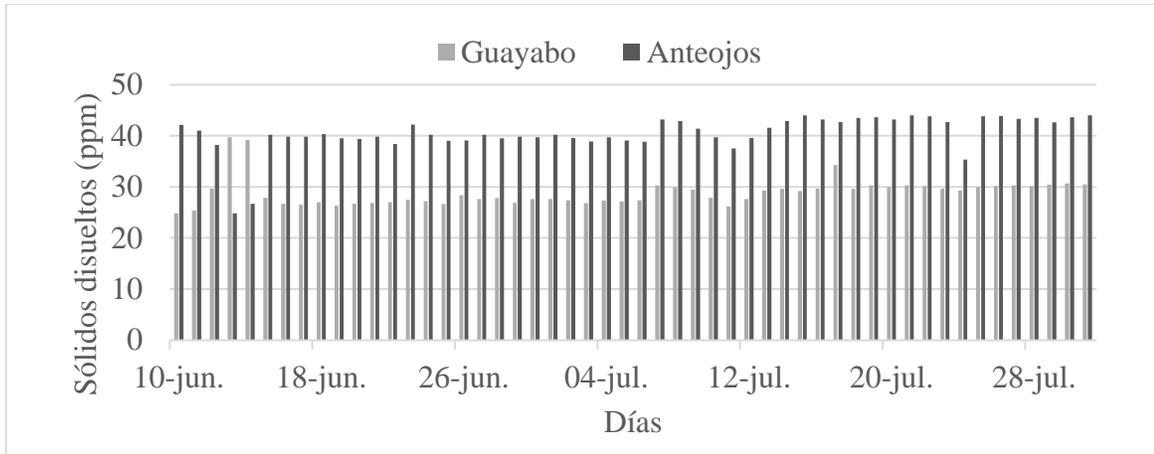


Figura 9. Concentración de sólidos totales disueltos de El Guayabo y Los Antejos

Las concentraciones máximas de nitratos en los tributarios fueron de 1 mg/L para El Guayabo y 2 mg/L para Los Antejos. La concentración de nitratos aumentó en los días en que ocurrieron eventos de lluvia que generaron mayor escorrentía (Figura 10). Sin embargo, las concentraciones de nitratos no tienen diferencia significativa entre ambos tributarios ($P=0.785$). En un estudio realizado en seis tributarios del río Tempisque de Costa Rica, se reportó un promedio de nitratos de 0.12-0.30 mg/L (Newbold *et al.* 1995). La diferencia puede relacionarse a que los tributarios del río Tempisque tienen menor área de drenaje en relación a los tributarios de este estudio, pero el comportamiento fue similar en relación a las crecidas de caudal.

Dado que el nitrógeno es altamente soluble, para eventos de precipitación se concentra más en el afluente por efecto de dilución. El mismo comportamiento fue demostrado en un estudio en la cuenca de río Embarras de Illinois, en el cual las concentraciones de nitratos se mantuvieron de 10-16 mg/L (David *et al.* 2002).

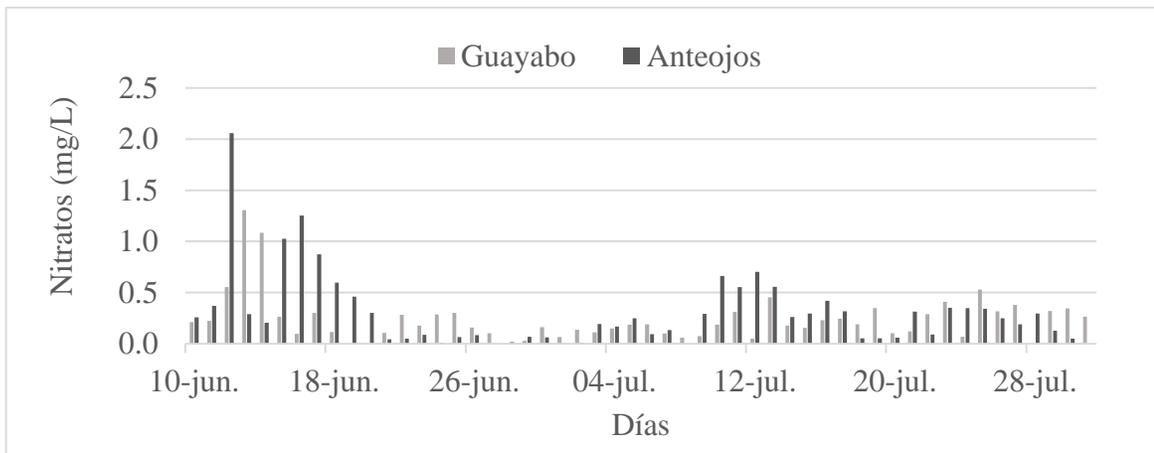


Figura 10. Concentración diaria de nitratos de los tributarios El Guayabo y Los Antejos

La media de la concentración de fosfatos en El Guayabo fue menor a la de Los Antejos, 0.28 y 0.38 mg/L respectivamente ($P=0.000$). La diferencia puede atribuirse al área de uso agrícola de Los Antejos y su incremento tras eventos de mayor precipitación (Royer *et al.* 2006). Dado que el fósforo es poco soluble, esto se relaciona con el arrastre de sedimentos en suspensión. Los resultados de un estudio de exportación de nutrientes al sur de Chile, bajo diferentes usos de suelo, mostraron mayores concentraciones en cuencas de uso agrícola y ganadero (Oyarzun *et al.* 1997).

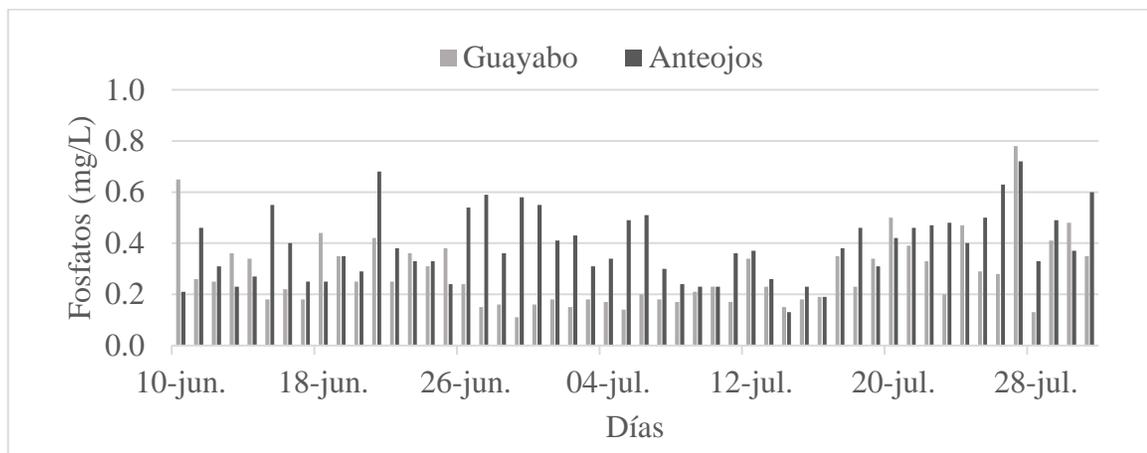


Figura 11. Concentración diaria de fosfatos de los tributarios El Guayabo y Los Antejos

La carga promedio diaria de los sólidos totales, sólidos totales disueltos y fosfatos tuvo un comportamiento similar en función del caudal (Figura 12 y 13). Se observó que los picos de carga exportada corresponden a los eventos de mayores precipitaciones e incrementos del caudal. A pesar que en la microcuenca Los Antejos las concentraciones de sólidos y fosfatos son mayores significativamente, El Guayabo exportó más carga promedio por día. Los sólidos totales exportados en El Guayabo fueron de 8 tn/km², los sólidos disueltos 2.3 tn/km² y los fosfatos 22 kg/ km².

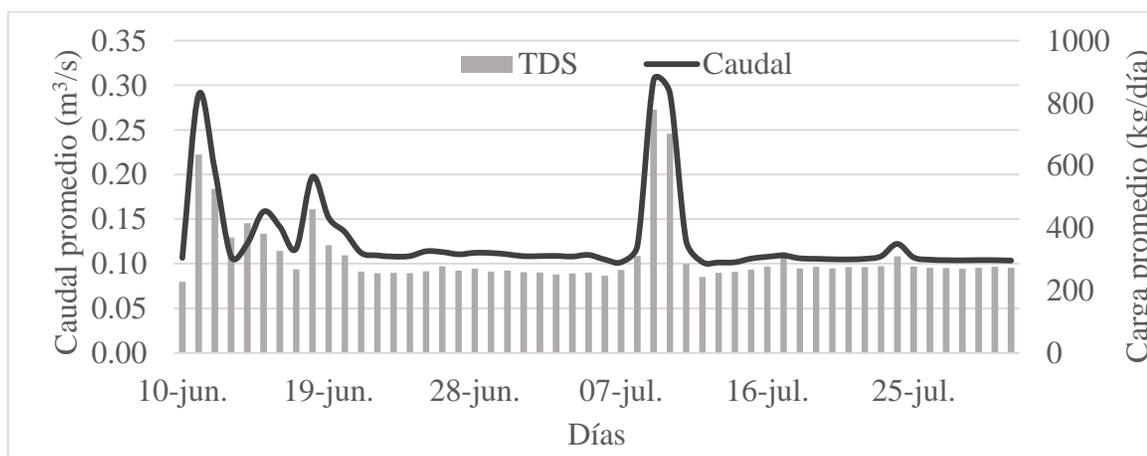


Figura 12. Exportación diaria de sólidos totales disueltos de la microcuenca El Guayabo

En Los Anteosjos los resultados fueron 5 tn/km² de sólidos totales, 1.5 tn/km² sólidos totales disueltos y 13 kg/km² de fosfatos. Se esperaba que los valores de sólidos y fosfatos fuesen mayores para Los Anteosjos por tener un porcentaje de agricultura a diferencia del Guayabo (6%). Pero los resultados mostraron que el factor determinante para la cantidad exportada es el caudal generado por unidad de área. Un estudio similar de medición de descargas de sólidos y nutrientes no encontró correlación fuerte con los porcentajes de las tierras de cultivo para los sólidos suspendidos, pero sí para los nutrientes con el flujo base (Jordan *et al.* 1997).

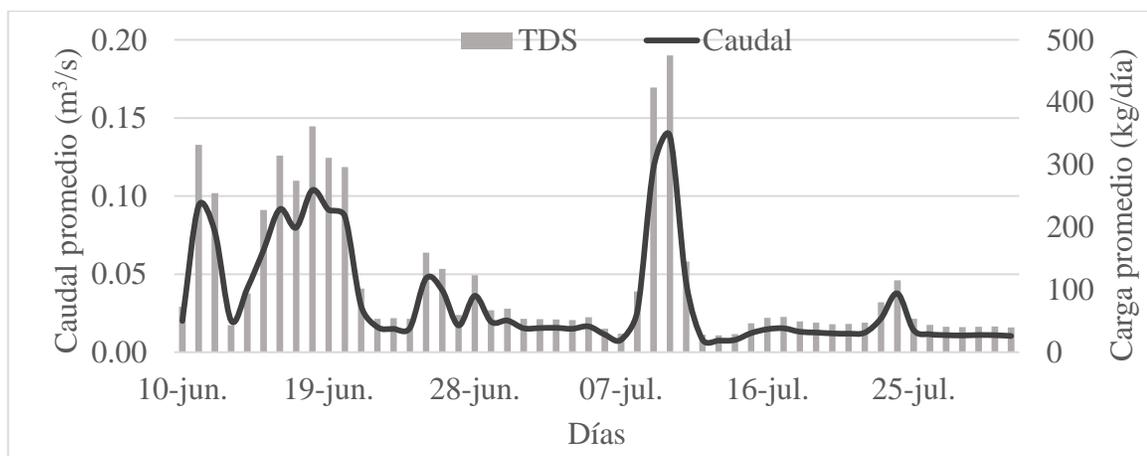


Figura 13. Exportación diaria de sólidos totales disueltos de la microcuenca Los Anteosjos

Tras eventos de precipitación la concentración de nitratos aumentó y por lo tanto, fueron los días con cargas de mayor exportación (Figuras 14 y 15). El Guayabo en total exportó más carga de nitratos que Los Anteosjos, 97 kg y 57 kg respectivamente. Muchos estudios sobre la exportación de nitratos y fosfatos al río Mississippi y el Golfo de México, han demostrado que la descarga de nutrientes aumenta significativamente durante eventos extremos (Royer *et al.* 2006; McIsaac *et al.* 2002; Kendrick *et al.* 2001).

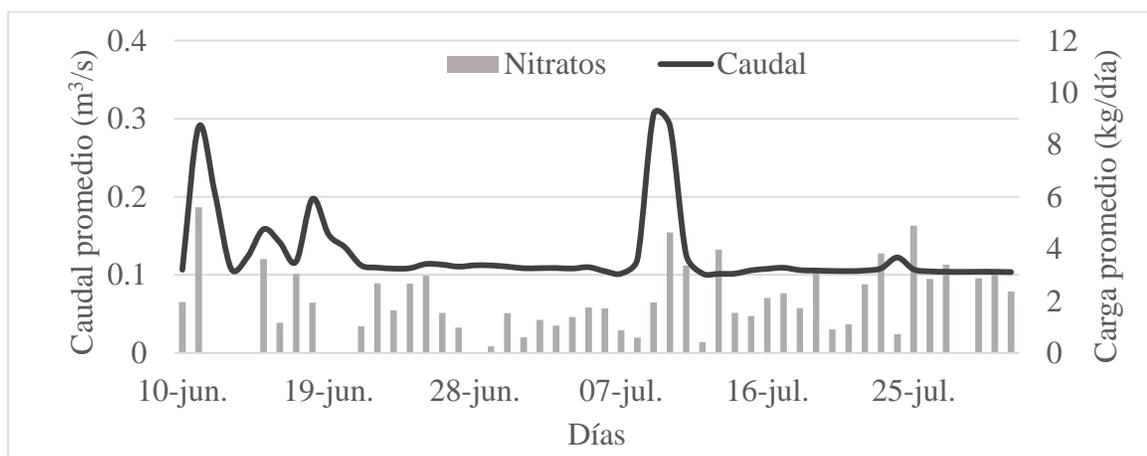


Figura 14. Exportación diaria de nitratos de la microcuenca El Guayabo

Con base en el caudal específico del área, El Guayabo exportó 14 kg/km² y Los Anteojos exportó 15 kg/km² de nitratos. En un estudio realizado en 249 cuencas hidrográficas se encontró que para microcuencas menores a 100 km², la exportación promedio de nitratos es de 360 kg/km² (Caraco *et al.* 2003). Otro estudio en el río Mississippi atribuyó una responsabilidad > 50% al caudal para la exportación de nitratos, aunque haya sido para una serie de años, el comportamiento fue similar a Los Anteojos y El Guayabo (Royer *et al.* 2006). Las concentraciones de nitratos se relacionan estrechamente con el comportamiento del caudal. Sin embargo, para este estudio no mostró diferencia significativa posiblemente por procesos de desnitrificación porque las muestras no fueron conservadas en frío el mismo día del muestreo debido a la distancia al sitio de medición y la falta de energía eléctrica en la zona.

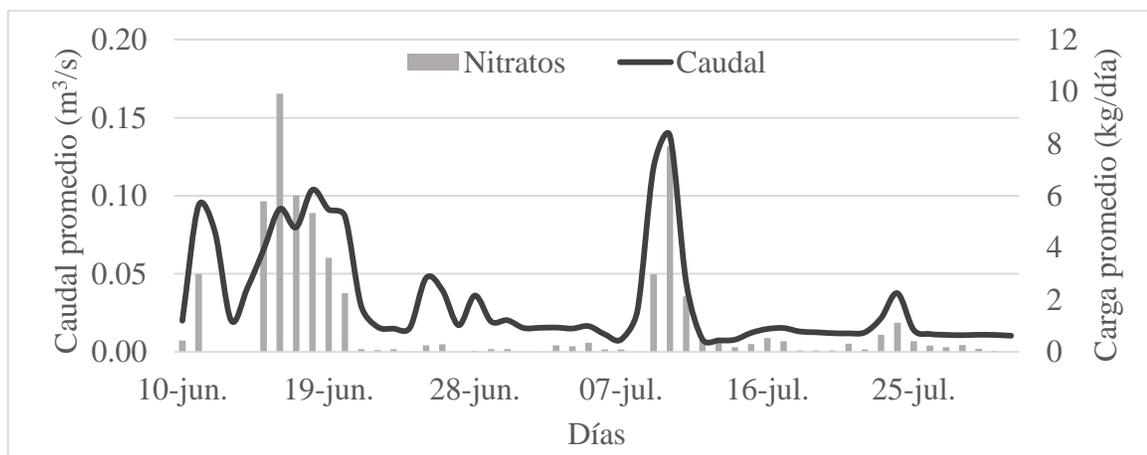


Figura 15. Exportación diaria de nitratos de la microcuenca Los Anteojos

La prueba estadística no paramétrica U de Mann-Whitney demostró que todos los parámetros, a excepción de los nitratos, fueron significativamente diferentes entre las quebradas El Guayabo y Los Anteojos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resultados de la comparación de las microcuencas

Parámetro	Z	Significancia
Sólidos totales	-2.728	0.006
Sólidos totales disueltos	-8.005	0.000
Turbidez	-3.046	0.002
Conductividad eléctrica	-7.951	0.000
Nitratos	-0.273	0.785
Fosfatos	-4.189	0.000

4. CONCLUSIONES

- Las concentraciones de sólidos y nutrientes estudiados fueron mayores en Los Anteojos que en El Guayabo y su incremento responde a la ocurrencia de eventos de precipitación. Los parámetros estudiados fueron significativamente diferentes entre ambos tributarios, con excepción de los nitratos. Diferencias se atribuyen a la mayor proporción de uso agrícola en Los Anteojos puesto que las condiciones morfométricas y edafológicas son similares en ambas microcuencas.
- La exportación total de sólidos y fosfatos fue mayor en El Guayabo por unidad de área contribuyente al sitio de análisis, mientras que la exportación de nitratos fue mayor en Los Anteojos. El factor que influye sobre las cargas de nutrientes exportados es el caudal generado por área contribuyente.
- Las concentraciones diarias de sólidos y nutrientes fueron mayores en Los Anteojos, a diferencia de las cargas exportadas que fueron mayores en El Guayabo. Es decir que factores como la pendiente, usos y coberturas, suelos y red vial pueden influir sobre la calidad del agua, sin embargo las pérdidas totales de sólidos y nutrientes dependen del caudal específico que generaron las microcuencas.

5. RECOMENDACIONES

- En un plan de manejo de la microcuenca Santa Inés ambos tributarios tienen prioridad. En El Guayabo las actividades deberán ser en obras de conservación de suelos. En Los Antejos se deberá capacitar a los agricultores para una producción agrícola con conservación de suelos y uso adecuado de agroquímicos.
- Realizar un estudio similar para años en los que el invierno se presente en forma normal, para comparar con los resultados de este estudio e identificar los efectos del Fenómeno del Niño en la exportación de nutrientes y sólidos de las microcuencas.
- Realizar un estudio de sólidos por cada tributario en el que se tomen las muestras en diferentes puntos del cauce, para identificar los sitios más vulnerables y de mayor exportación. Con esa información se podrá priorizar en un plan de manejo los puntos más urgentes para aplicar medidas de conservación de suelos.
- Considerar un estudio de parámetros de calidad de agua en la parte baja de la microcuenca Santa Inés particularmente en el área de captación para el proyecto de potabilización de agua de Zamorano.
- Promover en las comunidades la importancia del tratamiento de agua previo a su consumo. Mayor énfasis debe brindarse a las casas que se abastecen directamente de la quebrada Los Antejos.

6. LITERATURA CITADA

Acosta, A.F. y Kucharsky, O. 2012. Estudio edafológico y de cobertura para la modelación hidrológica con el modelo SWAT de la microcuenca Santa Inés, Honduras. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 35p.

APHA, AWWA y WEF (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation). 2005. Standard methods for the examination of water wastewater. 5 ed. American Public Association, Washington, DC. p 2-56.

Arroyave, A., J.F. Blanco y A. Taborda. 2012. Exportación de sedimentos desde cuencas hidrográficas de la vertiente oriental del Golfo de Urubá: influencias climáticas y antrópicas. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 11(20):13-30.

Borrego, A. y R. Hernández. 2014. Desarrollo de comunidades rurales y degradación de recursos forestales en la región occidente de México. Economía Informa (386): 16-30.

Bosco Imbert, J., J.A. Blanco y F.J. Castillo. 2004. Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global. In Valladares, F. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio de Ambiente Madrid. p 479-506.

Brito, C. y Hack, C. 2005. Efecto del agregado de fósforo sobre el rendimiento de *Stylosanthes guianensis* CIAT 184. Argentina. Revista de Investigaciones Agropecuarias 33:11.

Buckles, D. Triomphe, B. Sain, G. 1998. Los cultivos de cobertura en la agricultura de ladera. Biblioteca Nacional de Canadá. 243p.

Camas Gómez, R., A. Turrent Fernández, J.I. Cortes Flores, M. Livera Muñoz, A. González Estrada, B. Villar Sánchez, J. López Martínez, N. Espinoza Paz y P. Cadena Iñiguez. 2012. Erosión del suelo, escurrimiento y pérdida de nitrógeno y fósforo en laderas bajo diferentes sistemas de manejo en Chiapas, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol. 2:231-243.

Caracao , N.F., J.J. Cole, G.E. Likens, G.M. Lovett y K.C. Weathers. 2003. Variation in NO₃ export from flowing waters of vastly different sizes: Does one model fit all? Ecosystems 6: 344-352.

Castro Mendoza, I. 2013. Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. Ingeniería hidráulica y ambiental. Vol. 34 (2): 3-16.

David, M.B., L.E. Gentry, D.A. Kovacic y K.M. Smith. 1997. Nitrogen balance in and export from an agricultural watershed. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 26: 1038-1048.

David, M.B. y L.E. Gentry. 2000. Anthropogenic inputs of nitrogen and phosphorus and riverine export for Illinois, USA. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 29 (2): 494-508.

David, M.B., R.A. Cooke, L.E. Gentry y K.M. Stark. 2002. Transport of herbicides in the upper Embarras river watershed. Waste Management and Research Center. 45 p.

David, M.B., L.E. Drinkwater y G.F. Mclaac. 2010. Sources of nitrate yields in the Mississippi river basin. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 39: 1657-1667.

Frers, C. 2009. Los problemas de degradar el suelo. Argentina, El Cid Editor apuntes. 10 p.

García Ruiz, J.M. 1997. La agricultura tradicional de montaña y sus efectos sobre la dinámica hidromorfológica de laderas y cuencas. Instituto Pirenaico de Ecología. Zaragoza. p 119-140.

Gallardo, A., F. Covelo, L. Morillas y M. Delgado. 2009. Ciclo de nutrientes y procesos edáficos en los ecosistemas terrestres: especificidades del caso mediterráneo y sus implicaciones para las relaciones suelo-planta. *Ecosistemas* 18(2): 4-19.

Gómez Marín, A.M., D. Naranjo Fernández, A.A. Martínez y D.J. Gallego Suarez. Calidad del agua en la parte alta de las cuencas Juan Cojo y El Salado (Girardota-Antioquia, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. Vol. 60(1): 3735-3749.

HACH Company. 2004. Procedures manual. Colorímetro SR/890. p 483.

Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the geological society of America*. Vol. 56: 275-370.

Huezo Sánchez, L.A. 2011. Caracterización hidrológica y balance hídrico de la microcuenca Santa Inés, Honduras. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 19 p.

Jordan, T.E., D.L. Correll y D.E. Weller. 1997. Relating nutrient discharges from watersheds to land use and streamflow variability. *Water Resources Research*. Vol. 33 (11): 2579-2590.

Kendrick, K.M., A.P. da Costa, A.E. Leigh, M.R. Hinton y J.W. Peirce. 2001. Nitrate flux in the Mississippi River. *Nature*. Vol. 414: 166-167.

Kladivko, E.J., J.R. Frankenberger, D.B. Jaynes, D.W. Meek, B.J. Jenkinson y N.R. Fausey. 2004. Nitrate leaching to subsurface drains as affected by drain spacing and changes in crop production system. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 33: 1803-1813.

Matus, O., J. Faustino y F. Jiménez. 2009. Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. *CATIE: boletín técnico* (38): p 6-8.

McIsaac, G.F., M.B. David, G.Z. Gertner y D. A. Goodlsby. 2002. Relating net nitrogen in the Mississippi River basin to nitrate flux in the lower Mississippi River: A comparison of approaches. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 31: 1610-1622.

Meadows, M.W. y A.E. Skaugset. 2007. Hydrologic influences on the relationship between suspended sediment concentration and turbidity. Eds. A. McFarland y A. Saleh. *ASABE Publication*. p 244-250.

Newbold, J.D., B.W. Sweeney, J.K. Jackson y L.A. Kaplan. 1995. Concentrations and export of solutes from six mountain streams in northwestern Costa Rica. *Journal of the North American Benthological Society*. *Journal North American Benthological Society* 14: 21.37.

OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2015. Boletín El Niño/La Niña hoy: situación actual y perspectivas. 5p.

Oyarzun, C.E., H. Campos y A. Huber. 1997. Exportación de nutrientes en microcuencas con distinto uso del suelo en el sur de Chile (Lago Rupanco, X Región). *Revista Chilena de Historia Natural* 70: 507-519.

Rivera, B., D.M. Tangarife y H. Rojas. 1999. Desarrollo metodológico para la caracterización de caudales y niveles de sedimentación. Universidad de Caldas Colombia. p 8.

Royer, T.V., M.B. David y L.E. Gentry. 2006. Timing of riverine export of nitrate and phosphorus from agricultural watersheds in Illinois: Implications for reducing nutrient loading to the Mississippi River. *Environmental Science & Technology*. Vol. 40 (13): 4126-4131.

Sala, M. y J. Farguell. 2002. Exportación de agua y sedimento en dos pequeñas cuencas mediterráneas bajo diferente usos del suelo. *Sistema Costero Catalán*. *Revista C&G* 16(1-4): 97-109.

Sánchez Morales, K.A., J.F. Tercero Iglesias. 2010. Diagnóstico técnico del estado actual de la microcuenca de la “Quebrada Aguja”, Güinope, El Paraiso, Honduras. Proyecto de graduación del programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente Zamorano. Honduras. 61 p.

Slaets, J.I., P. Schmitter, T. Hilger, M. Lamers, H.P. Piepho, T.D. Vien y G. Cadisch. 2014. A turbidity-based method to continuously monitor sediment, carbon and nitrogen flows in mountainous watersheds. *Journal of Hydrology* 513: 45-57.

Tormo, J., E. Brochet y P. García Fayos. 2009. Restauración y revegetación de taludes de carreteras en ambientes mediterráneos semiáridos: procesos edáficos determinantes para el éxito. *Ecosistemas* 18(2): 79-90.

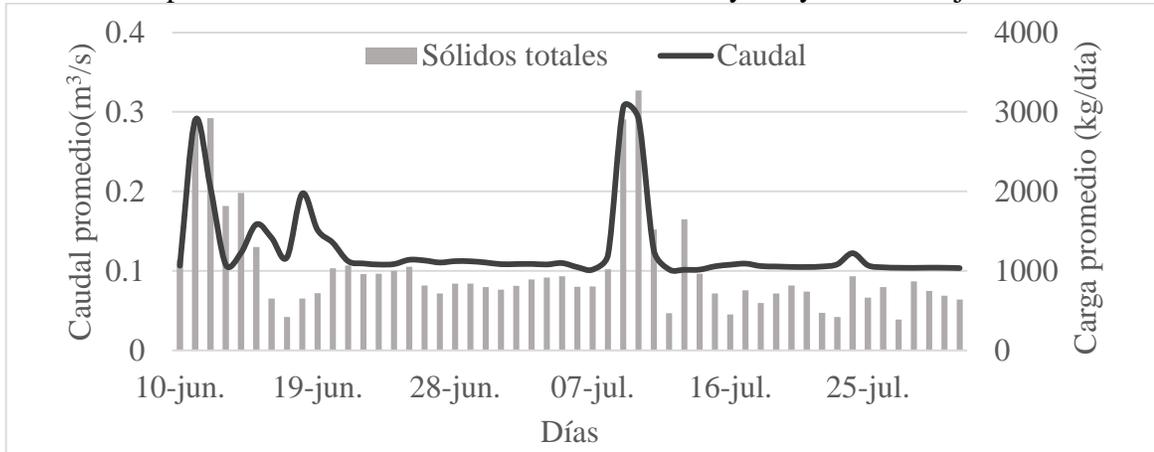
Vitousek, P. Chair, J. Howarth, R. Likens, G. Matson, P. Schindler, W. Schlesinger, D y Tilman, G. 1997. Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle: Causes and Consequences. *Ecological Society of America* 7:16.

Woli, K., A. Hayakawa, T. Nagumo, H. Imai, T. Ishiwata y R. Hatano. 2008. Assessing the impact of phosphorus cycling on river water P concentration in Hokkaido. *Soil Science and Plant Nutrition* 54:310-317.

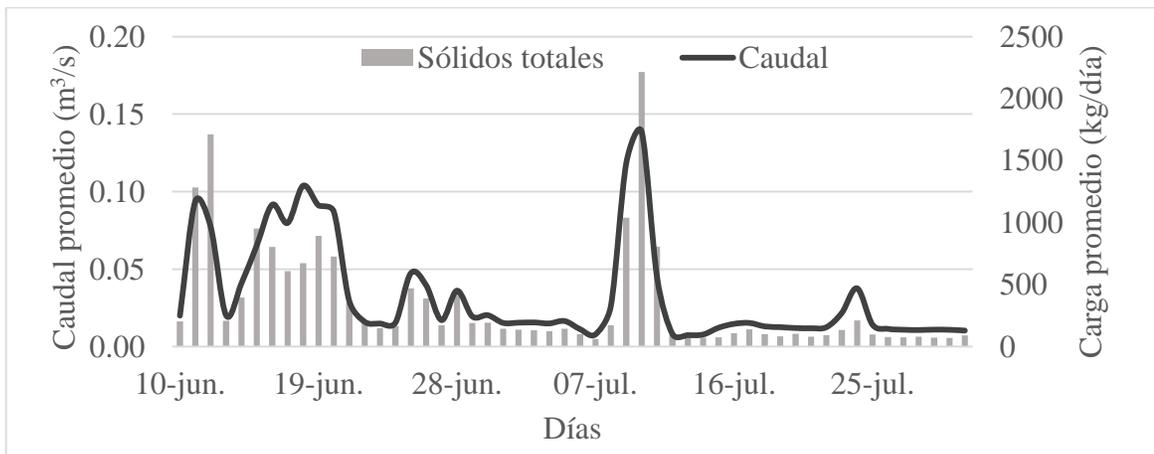
WHO (World Health Organization). 2003. Health criteria and other supporting information. 2 ed. Vol. 2. 5p.

7. ANEXOS

Anexo 1. Exportación diaria de sólidos totales de El Guayabo y Los Antejos

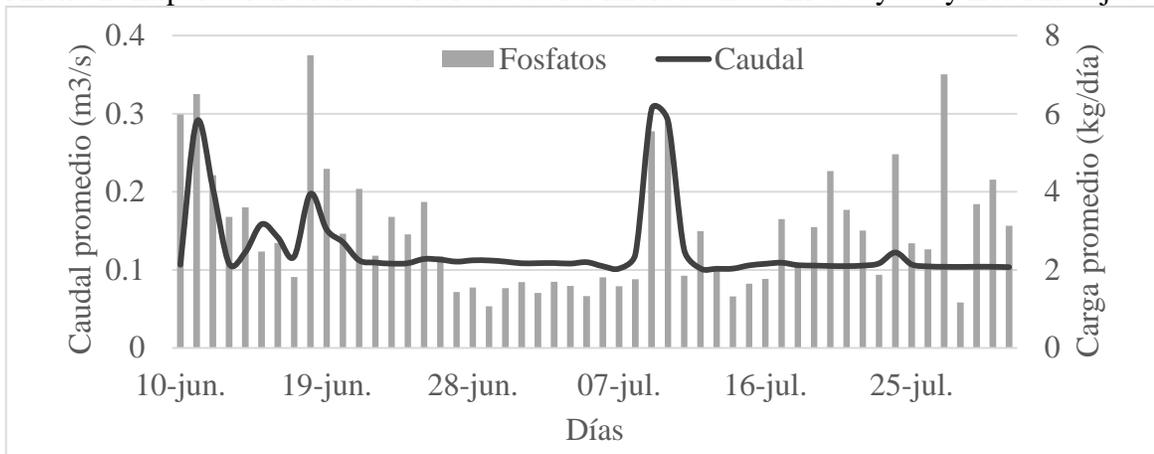


a) El Guayabo

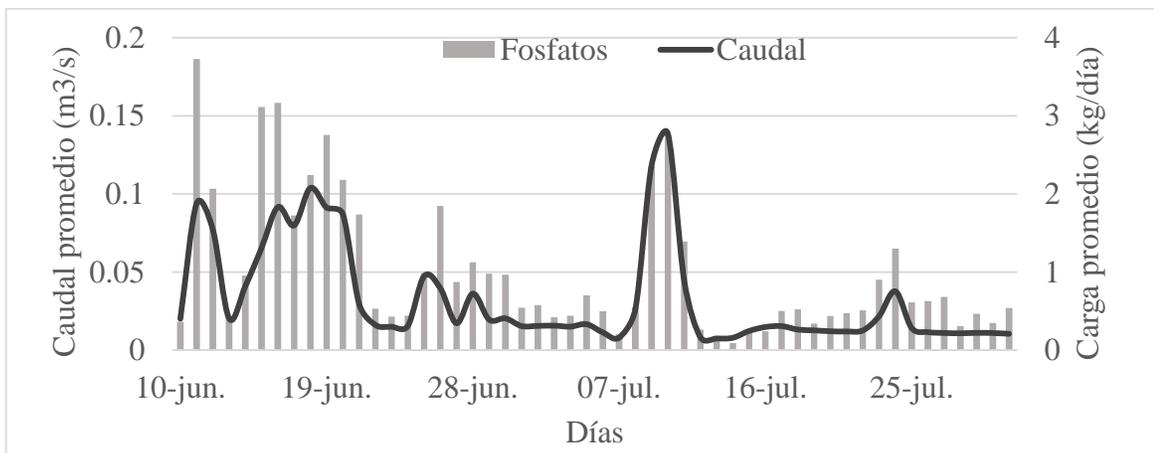


b) Los Antejos

Anexo 2. Exportación diaria de fosfatos de las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos



a) El Guayabo



b) Los Anteojos