



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES

Tropical Journal of Environmental Sciences



Variación temporal y espacial de la calidad de las aguas superficiales en la subcuenca del río Virilla (Costa Rica) entre 2006 y 2010

Temporal and spatial variation in quality of surface water in the watershed Virilla (Costa Rica) River between 2006 and 2010

*Jorge Herrera^a, Susana Rodríguez^b, José F. Rojas^c,
Érika Herrera^d y María Chaves^e*

^a Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, jorge.herrera.murillo@una.cr ^b Química e investigadora en la Escuela de Química de la Universidad de Costa Rica, susana.rodriguez@ucr.ac.cr. ^c Químico e Investigador s investigador en dicho Laboratorio, Costa Rica, jfrojas60@yahoo.com. ^d Química, responsable del Sistema de Calidad del Laboratorio de Análisis Ambiental mencionado, Costa Rica, erika.herrera.delgado@una.cr. ^e Química industrial, es encargada de la Sección de Aguas del mismo Laboratorio, Costa Rica, maria.chaves.villalobos@una.cr.

Director y Editor:

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

Consejo Editorial:

Enrique Lahmann, UICN, Suiza
Enrique Leff, UNAM, México
Sergio Molina, Universidad Nacional, Costa Rica
Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica
Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica
Gerardo Budowski, Universidad para la Paz, Costa Rica

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas



Variación temporal y espacial de la calidad de las aguas superficiales en la subcuenca del río Virilla (Costa Rica) entre 2006 y 2010

Jorge Herrera, Susana Rodríguez, José F. Rojas, Erika Herrera y María Chaves

J. Herrera, químico, es coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional. J. Rojas, É. Herrera y M. Chaves, también químicos, son investigadores en ese mismo laboratorio. S. Rodríguez, química, es investigadora en la Universidad de Costa Rica.

Resumen

Se analizaron los datos correspondientes a 25 variables de calidad de agua medidas en muestras recolectadas entre enero de 2006 y diciembre de 2010, en 64 sitios de monitoreo distribuidos a lo largo de la subcuenca del río Virilla, en Costa Rica. Mediante el uso de análisis de factor se lograron identificar dos fuentes potenciales de contaminación que explican el 80,9 % de la varianza total en zonas de baja contaminación, dos fuentes que explican el 77,1 % de la varianza total en zonas de moderada contaminación y dos fuentes que explican el 67,8 % de la varianza total en zonas de alta contaminación. La mayoría de las variables de calidad de agua fueron influenciadas principalmente por la contaminación debida a aguas residuales industriales, actividades agrícolas y descargas urbanas.

Abstract

In this work, we considered data of 25 water quality variables collected between January 2006 to December 2010 at 64 monitoring sites along the Virilla River Subbasin in Costa Rica. Factor analysis identified two potential pollution sources that explained 80.9% of the total variance in LP, two potential pollution sources that explained 77.1% of the total variance in MP, and two potential pollution sources that explained 67.8% of the total variance in HP. Most water quality variables were influenced primarily by pollution due to industrial wastewater, agricultural activities and urban runoff.

Introducción

La contaminación de las aguas superficiales con productos químicos tóxicos y los procesos de eutrofización causados por los vertidos libres de aguas residuales con alto contenido de nutrientes son los principales problemas presentes en la mayoría de las cuencas en los países en desarrollo (Kowalkowski et al., 2006). La degradación de la calidad del agua superficial debido a estos contaminantes se ha traducido en la alteración de la composición de las especies presentes y la disminución de la salud general de las comunidades acuáticas dentro de la cuenca (Campbell et al., 1993; Pekey et al., 2004).

Los ríos pueden asimilar y transportar los desechos generados a partir de fuentes puntuales, tales como las descargas de aguas residuales municipales e industriales y las fuentes difusas, como la escorrentía de las tierras agrícolas y áreas urbanas; sin embargo, esta capacidad es limitada y

Palabras clave: contaminación de agua, Costa Rica, identificación de fuentes, subcuenca del río Virilla.

Key words: Costa Rica, source apportionment, water pollution, Virilla Subbasin.

depende de las características del cuerpo de agua superficial (Vega et al., 1998). La calidad del agua dulce refleja los efectos combinados de muchos procesos a lo largo de las vías de agua y está muy influenciada por las características de la cuenca, incluyendo litología, aportes atmosféricos, las condiciones climáticas y los insumos antropogénicos (Bricker y Jones, 1995; Bhaduri et al., 2001; Ren et al., 2003; Xian et al., 2007).

La subcuenca del río Virilla se encuentra en la región central-occidental de Costa Rica (figura 1), con una precipitación media anual en el rango de 2638 ± 900 mm. La temporada lluviosa va de mayo a noviembre, pero la mayoría de las lluvias se producen durante los meses de septiembre y octubre. La superficie total de esta subcuenca cubre aproximadamente $916,1 \text{ km}^2$ y representa solo el 1,8 % del total del territorio de Costa Rica. Sin embargo,

en esta subcuenca vive el 50 % (2.250.330 habitantes) de la población del país, distribuida en 27 municipios, que no tienen ningún tipo de coordinación entre ellos en términos de manejo de cuencas (Inec, 2000). Los recursos hídricos que se generan en la zona proveen de agua potable al 54 % de la población en el área metropolitana de Costa Rica y se utilizan para generar el 15 % de la energía hidroeléctrica que se consume

Figura 1. Mapa de localización de la subcuenca del río Virilla.

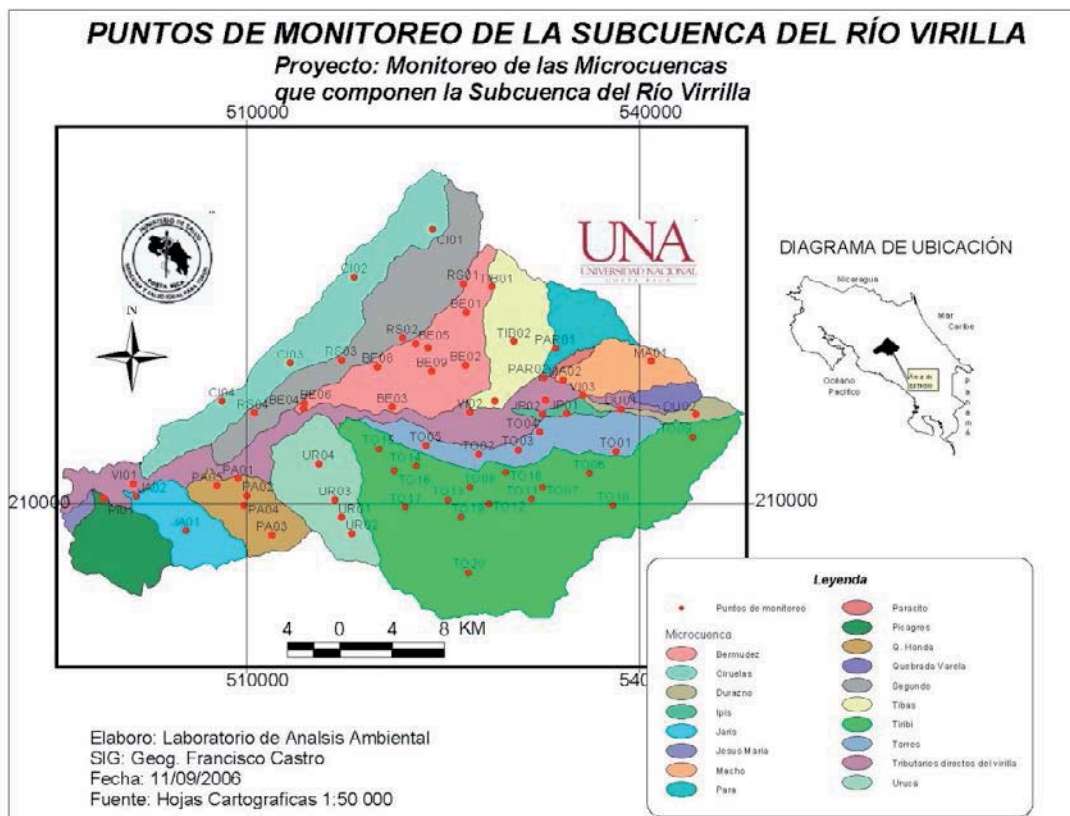


en el país. El principal uso del suelo predominante en la subcuenca es urbano (32,1 %), hierba (25,2 %), las plantaciones de café (17,4 %), bosque (8 %) y el cultivo de caña de azúcar (3,5 %).

El rápido crecimiento de la economía en esta región ha provocado importantes cambios en los patrones de uso del suelo/tierra generando, a su vez, una degradación importante en la calidad del agua. Tal deterioro ambiental no solo impide el desarrollo sostenible, sino que

también pone en peligro el estado de salud de las poblaciones humanas. La evaluación precisa del tipo y la extensión de la contaminación del agua es una tarea difícil, debido a los diversos procesos y fenómenos complejos que caracterizan estos ambientes. En vista de las consideraciones anteriores, los objetivos principales de este trabajo son: clasificar la calidad del agua superficial en zonas de contaminación, identificar los principales factores que influyen en la calidad del agua de estas zonas, analizar las variaciones espaciales y temporales en la calidad del agua, explorar las posibles fuentes de contaminantes y estimar las contribuciones de fuentes potenciales para las variables de calidad de agua en los sitios de monitoreo.

Figura 2. Localización de los sitios de monitoreo en la subcuenca del río Virilla.



Metodología

Muestreo

La figura 2 muestra la localización de los 64 sitios de muestreo ubicados en la subcuenca del río Virilla, los cuales se distribuyeron en las 17 microcuencas que la integran, a saber: Ciruelas (CI), Segundo (RS), Bermúdez (BE), Tibás (TIB), Pará (PAR), Paracito (PARC), Macho (MA), Durazno (DU), Quebrada Varela (QV), Ipís (IP), Torres (TO), Rivera (RIV), Uruca (UR), Jaris (JA), Picagres (PI), Jesús María (JM) y Pacacua (PA).

Los sitios de muestreo se seleccionaron con el fin de incluir los lugares antes y después de los principales asentamientos humanos, y de acuerdo a importantes cambios en los patrones de uso del suelo y las pendientes dentro de cada microcuenca.

Durante cada campaña de muestreo, se recolectaron muestras de agua compuestas, las cuales fueron generadas al mezclar, en forma proporcional al caudal registrado en el cuerpo de agua, muestras simples tomadas a lo largo de un período de 6 horas. Las muestras se recolectaron usando botellas de polietileno de alta densidad de 3 litros y se conservaron a 4 °C en hieleras para ser transportadas al laboratorio. Las muestras se tomaron a 0,5-1 m de distancia de la orilla del río y a una profundidad promedio de 20 cm. Para el análisis de metales pesados, se utilizaron botellas adicionales, las cuales se colocaron al menos 24 horas en un baño de ácido nítrico al 10 % y luego se enjuagaron varias veces con agua desionizada antes del muestreo.

Se realizó un total de 20 campañas de muestreo entre enero de 2006 y diciembre de 2010 durante las épocas seca y lluviosa, así como en el periodo de transición entre ambas.

Análisis químico

Las mediciones de los siguientes parámetros fisicoquímicos se llevaron a cabo *in situ*: temperatura del agua, pH y el oxígeno disuelto. El pH se midió utilizando un instrumento portátil OAKTON PH5 Ac; el oxígeno disuelto, con un oxímetro marca Thermo Orion 3; y la temperatura del agua, con un termómetro de mercurio sumergido durante 5 minutos. Tanto el oxímetro como el pHmetro se calibraron antes de cada evento de muestreo y se comprobaron varias veces durante el día. Los análisis químicos realizados a las muestras recolectadas se indican en el cuadro 1.

El análisis de metales trazas se efectuó en muestras sin filtrar (totales) y en muestras filtradas con filtros de nitrato de celulosa de 0,45 micras (disueltos). Antes de las mediciones, las muestras de agua fueron digeridas por acidificación con

Cuadro 1. Métodos analíticos empleados en la evaluación de las muestras de agua recolectadas.

Variable	Método	Límite de detección	Unidades
Demanda química de oxígeno (DQO)	5220 D standard methods	6	mg O ₂ /l
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	5210 D standard methods	3	mg O ₂ /l
pH	4500-H ⁺ B standard methods	Na	pH units
Oxígeno disuelto	4500-O standard methods	0,10	mg O ₂ /l
Sólidos sedimentables	2540 standard methods	0,1	ml/l
Sólidos suspendidos totales	2540 D standard methods	0,6	mg/l
Turbiedad	Nefelométrico	Na	NTU
Fósforo total	4500-P C standard methods	0,7	mg/l
NO ₂ ⁻	4500-NO ₂ ⁻ standard methods	8	µg/l
NH ₄ ⁺	4500-NH ₃ standard methods	14	µg/l
Cl ⁻	4110 standard methods	0,10	mg/l
SO ₄ ²⁻	4110 standard methods	0,14	mg/l
NO ₃ ⁻	4110 standard methods	0,05	mg/l
Na	3111 standard methods	0,11	mg/l
K	3111 standard methods	0,07	mg/l
Ca	3111 standard methods	0,8	mg/l
Mg	3111 standard methods	0,01	mg/l
Zn	3111 standard methods	0,02	mg/l
Al	3113 standard methods	1,1	µg/l
Fe	3113 standard methods	4	µg/l
Cr	3113 standard methods	3	µg/l
Cu	3113 standard methods	1,5	µg/l
Ni	3113 standard methods	2,4	µg/l
Pb	3113 standard methods	1,8	µg/l
Mn	3113 standard methods	2	µg/l

Cuadro 2. Promedios y desviaciones estándar de los parámetros fisicoquímicos evaluados en las muestras de aguas recolectadas. 2006-2010.

	Microcuencas										
	Ciruelas	Segundo	Bermúdez	Torres	Uruca	Tibás	Picagres	Pacacua	Ipis	Macho	Jaris
pH	7,46 ± 0,34	7,35 ± 0,42	7,33 ± 0,50	7,35 ± 0,44	7,82 ± 0,41	7,33 ± 0,47	8,27 ± 0,17	7,82 ± 0,39	7,70 ± 0,37	7,60 ± 0,50	8,22 ± 0,24
Turbid (NTU)	2,55 ± 3,45	3,77 ± 5,23	8,61 ± 9,13	11,3 ± 20,6	8,22 ± 9,94	4,99 ± 7,62	5,77 ± 5,23	31,2 ± 77,8	2,37 ± 2,18	1,15 ± 0,98	5,67 ± 6,64
Sol. Sed (ml/l)	0,2 ± 0,1	0,21 ± 0,17	0,45 ± 0,90	0,35 ± 0,45	0,20 ± 0,15	0,15 ± 0,05	0,11 ± 0,03	0,25 ± 0,20	0,10 ± 0,05	0,15 ± 0,10	0,10 ± 0,02
Sól. Susp (mg/l)	10,2 ± 8,4	18,5 ± 17,0	39,3 ± 88,3	69 ± 151	50 ± 64	11,5 ± 13,5	17,0 ± 9,6	164 ± 402	9,6 ± 8,7	6,7 ± 8,2	23,3 ± 19,7
DQO (mg O ₂ /l)	34 ± 28	71 ± 63	79 ± 78	85 ± 64	53 ± 58	60 ± 66	43 ± 27	62 ± 46	55 ± 34	45 ± 26	69 ± 35
DBO (mg O ₂ /l)	15 ± 9	23 ± 27	25 ± 24	29 ± 22	15 ± 7	22 ± 34	14 ± 8	19 ± 12	20 ± 13	13 ± 7	16 ± 10
Cl ⁻ (mg/l)	4,88 ± 4,34	5,59 ± 5,67	12,5 ± 9,9	9,32 ± 6,41	4,18 ± 4,87	3,61 ± 3,66	1,81 ± 0,69	3,01 ± 2,86	10,6 ± 3,0	3,2 ± 2,6	1,7 ± 0,7
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	10,2 ± 5,4	12,3 ± 14,6	15,6 ± 12,0	16,6 ± 8,8	7,7 ± 3,0	4,34 ± 5,06	6,29 ± 3,53	12,3 ± 6,2	19,2 ± 4,1	6,6 ± 2,2	9,7 ± 3,7
NO ₃ ⁻ (mg/l)	4,8 ± 4,0	5,2 ± 4,5	5,5 ± 7,2	6,8 ± 5,1	4,6 ± 2,6	2,54 ± 2,80	1,60 ± 0,75	3,28 ± 2,76	10,6 ± 3,7	3,5 ± 2,6	1,3 ± 0,5
P Total (mg/l)	1,05 ± 0,90	1,20 ± 1,15	1,87 ± 1,26	2,05 ± 1,15	0,83 ± 0,64	1,10 ± 0,90	0,76 ± 0,41	0,95 ± 0,92	0,73 ± 0,49	0,66 ± 0,46	0,65 ± 0,34
NO ₂ ⁻ (µg/l)	207 ± 347	92 ± 136	426 ± 693	330 ± 355	45 ± 46	40 ± 22	36 ± 24	191 ± 287	473 ± 403	53 ± 38	66 ± 72
NH ₄ ⁺ (µg/l)	311 ± 406	177 ± 197	996 ± 1535	806 ± 844	150 ± 122	143 ± 158	165 ± 160	311 ± 188	702 ± 346	131 ± 113	158 ± 112
Na (mg/l)	5,95 ± 3,61	5,84 ± 5,21	13,7 ± 10,4	11,0 ± 7,5	5,2 ± 3,2	3,68 ± 3,62	6,46 ± 1,73	7,58 ± 5,48	13,7 ± 8,5	4,5 ± 1,9	6,8 ± 2,9
K (mg/l)	2,47 ± 0,87	2,35 ± 1,36	4,89 ± 2,63	4,34 ± 2,16	1,11 ± 0,83	1,46 ± 0,94	1,29 ± 0,36	1,82 ± 1,41	5,2 ± 1,9	3,2 ± 1,1	1,8 ± 1,5
Ca (mg/l)	2,75 ± 1,67	2,17 ± 1,32	5,36 ± 3,15	7,89 ± 4,42	10,5 ± 6,4	4,4 ± 4,6	11,2 ± 4,1	9,2 ± 10,2	13,7 ± 2,3	2,5 ± 0,7	13,5 ± 1,7
Mg (mg/l)	2,31 ± 1,42	2,95 ± 2,02	3,78 ± 2,28	4,25 ± 1,80	4,05 ± 1,52	5,31 ± 2,04	4,70 ± 2,15	4,13 ± 2,02	5,50 ± 1,32	5,50 ± 1,32	5,90 ± 3,70
Al (µg/l)	320 ± 214	254 ± 184	336 ± 209	312 ± 246	283 ± 188	318 ± 283	212 ± 176	147 ± 155	160 ± 44	108 ± 32	171 ± 53
Fe (µg/l)	153 ± 238	147 ± 71	253 ± 367	177 ± 273	116 ± 105	241 ± 406	256 ± 340	183 ± 141	208 ± 256	152 ± 204	103 ± 88
Cr (µg/l)	14,3 ± 9,1	13,7 ± 14,9	16,2 ± 23,2	58,3 ± 44,2	8,1 ± 6,4	20,5 ± 27,6	14,3 ± 12,7	24,4 ± 22,0	24,4 ± 22,0	15,2 ± 9,6	8,1 ± 5,3
Cu (µg/l)	15,2 ± 1,5	14,8 ± 3,2	17,1 ± 6,4	23,6 ± 41,3	14,6 ± 7,8	12,3 ± 3,9	8,7 ± 3,1	10,0 ± 4,7	9,6 ± 6,0	11,4 ± 4,5	9,2 ± 3,3
Ni (µg/l)	9,3 ± 7,3	10,5 ± 6,8	6,7 ± 4,7	5,6 ± 4,7	5,3 ± 2,1	4,1 ± 2,9	3,6 ± 3,9	3,6 ± 3,9	4,6 ± 2,3	3,6 ± 1,0	6,0 ± 3,2
Pb (µg/l)	5,2 ± 1,1	2,9 ± 1,5	3,7 ± 0,7	8,2 ± 2,1	3,1 ± 1,2	4,6 ± 2,2	2,3 ± 0,5	2,1 ± 0,7	6,5 ± 1,8	4,0 ± 2,1	3,5 ± 0,3
Mn (µg/l)	17,7 ± 18,6	22,8 ± 19,7	40,7 ± 53,7	28,7 ± 21,3	21,2 ± 17,9	28,6 ± 24,1	15,4 ± 19,1	22,1 ± 18,0	34 ± 27	28 ± 13	19 ± 8
Zn (mg/l)	0,30 ± 0,09	0,19 ± 0,06	0,28 ± 0,04	0,37 ± 0,11	0,22 ± 0,05	0,31 ± 0,06	0,25 ± 0,09	0,17 ± 0,11	0,14 ± 0,08	0,10 ± 0,05	0,22 ± 0,07
Temperat (°C)	22,6 ± 2,4	21,4 ± 3,1	22,1 ± 4,2	21,3 ± 3,1	22,8 ± 1,1	20,2 ± 2,3	22,7 ± 3,2	22,5 ± 1,5	19,8 ± 1,3	18,9 ± 1,5	23,1 ± 1,1
O ₂ disuelto (mg O ₂ /l)	4,21 ± 1,67	4,09 ± 1,27	3,83 ± 1,45	3,47 ± 1,50	3,95 ± 1,20	4,11 ± 1,66	4,23 ± 1,09	4,10 ± 1,27	4,35 ± 1,05	4,49 ± 0,95	4,05 ± 0,60

Nota: Los valores indicados como ± corresponden a la desviación estándar.

HNO₃ (2,5 ml de ácido a 25 ml de la muestra). Los valores típicos registrados en los blancos de campo y de laboratorio, para todos los metales medidos, se encontraban por debajo del límite de detección o eran insignificantes en comparación a las mediciones efectuadas en aguas naturales.

Resultados y discusión

Calidad del agua superficial en la subcuenca del río Virilla

Los resultados obtenidos para las variables fisicoquímicas evaluadas en cada microcuenca se resumen en el cuadro 2. Debido a los diferentes factores fisiográficos que influyen en forma significativa sobre la composición química del agua, se lograron determinar algunas diferencias existentes entre las microcuencas localizadas en el noroeste de la subcuenca con respecto a la región sureste. La zona sureste de la subcuenca del río Virilla se caracteriza por poseer suelos vertisoles (fértils, de pH alto y elevados contenidos de Ca

y Mg). Lo anterior podría justificar la presencia de porcentajes equivalentes de Ca y Mg mayores en microcuencas como Pacacua y Torres (Ca: 17,3 y 25,2 %, Mg: 30 y 35,5 %, respectivamente) en comparación con aquellos situados en el noroeste de la subcuenca, como el caso de los ríos Segundo y Bermúdez (Ca: 13,8; 13,5 % y Mg: 16,6; 15,9 %, respectivamente), donde prevalecen suelos andisoles (Alvarado y Forsythe, 2005).

La clasificación de la calidad de los cuerpos de agua superficial generalmente se basa en la comparación de los datos de concentración de diversos contaminantes medidos en el campo, contra los valores límite establecidos en instrumentos legales (cuadro 3). Las normas de calidad de los ríos y otros cuerpos de agua se definen en función de los usos potenciales de agua. El reglamento para la evaluación y clasificación de calidad del agua superficial en Costa Rica define cinco clases de uso del agua. Sin embargo, existen métodos alternativos para evaluar la calidad de los patrones de la superficie del agua.

Cuadro 3. Guías para la clasificación de los cuerpos de agua superficial de Costa Rica.

Guías Decreto 33903-Minae-S						
Parámetro	Río Torres	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase V
Turbiedad (NTU)	11,3 ± 20,6	< 25	25 a <100	100 a 300		
SST (mg/l)	69 ± 151	< 10	10 a 25	25 a 100	100 a 300	> 300
DQO (mg O ₂ /l)	85 ± 64	< 20	20 a <25	25 a <50	50 a <100	100 a 300
Cl ⁻ (mg/l)	9,32 ± 6,41	< 100	100 a 200	NA	NA	NA
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	16,6 ± 8,8	> 150	150 a 250	>250	>250	>250
NO ₃ ⁻ (mg/l)	6,8 ± 5,1	< 22	22 a < 44	44 a < 66	66 a < 88	> 88
Mg (mg/l)	4,25 ± 1,80	<8,6	8,6 a 14,4	> 14,4	> 14,4	> 14,4
Cr (µg/l)	58,3 ± 44,2	< 50	50	200	500	> 500
Cu (µg/l)	23,6 ± 41,3	< 500	500 a 1000	1000 a 1500	1500 a 2000	2000 a 2500
Ni (µg/l)	5,6 ± 4,7	< 50	50	100	200	300
Pb (µg/l)	8,2 ± 2,1	< 30	30 a <50	50 a < 100	100 a <200	200

Cuadro 4. Resultados de la evaluación global Fuzzy y clasificación de los sitios de muestreo de contaminación.

Sitios de muestreo	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Sitios de muestreo	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
BE-01	0,514	0,304	0,172	0	0	JA-02	0,420	0,246	0,162	0,172	0
BE-02	0,536	0,320	0,133	0	0	MA-01	0,666	0,263	0,071	0	0
BE-03	0,566	0,094	0,320	0	0	MA-02	0,666	0,071	0,263	0	0
BE-04	0,230	0,291	0,186	0,283	0	PA-01	0,361	0,442	0,196	0	0
BE-05	0,230	0,312	0,376	0,072	0	PA-02	0,484	0,182	0,208	0,120	0
BE-06	0,310	0	0,351	0,188	0,142	PA-03	0,233	0,065	0,268	0,332	0,097
BE-07	0,330	0,340	0,177	0,153	0	PA-04	0,038	0,301	0,290	0,323	0,048
BE-08	0,536	0,124	0,268	0,062	0	PA-05	0,312	0,021	0,118	0,536	0,007
BE-09	0,293	0,367	0,197	0,133	0	PAR-01	0,666	0,022	0,311	0	0
CI-01	1	0	0	0	0	PAR-02	0,666	0	0	0,315	0,015
CI-02	0,947	0,053	0	0	0	PI-01	0,511	0,250	0,238	0	0
CI-03	0,648	0,042	0,310	0	0	RS-01	0,666	0,156	0,177	0	0
CI-04	0,276	0,440	0,284	0	0	RS-02	0,470	0,196	0,086	0,245	0
DU-01	0,330	0,293	0,357	0,009	0	RS-03	0,300	0,367	0,276	0,056	0
DU-02	0,330	0,349	0,293	0,019	0	RS-04	0,333	0,204	0,079	0,357	0,023
IP-01	0,667	0,047	0,286	0	0	TIB-01	0,666	0	0,306	0,026	0
IP-02	0,586	0,080	0,095	0,239	0	TIB-02	0,565	0,101	0,120	0,211	0
JA-01	0,313	0,349	0,092	0,245	0	TIB-03	0,666	0,143	0,190	0	0
TO-01	0,330	0,343	0,317	0	0	TO-11	0,330	0,202	0,341	0,127	0
TO-02	0,330	0,291	0,190	0,179	0	TO-12	0,330	0,179	0,124	0,367	0
TO-03	0,330	0,348	0,212	0,100	0	TO-13	0,330	0,194	0,345	0,129	0
TO-04	0,660	0,007	0,323	0	0	TO-14	0,330	0,173	0,353	0,144	0
TO-05	0,330	0,008	0,578	0,074	0	TO-16	0,330	0,348	0,320	0	0
TO-06	0,330	0,345	0,264	0,051	0	TO-17	0,330	0	0,268	0,392	0
TO-07	0,330	0,098	0,182	0,344	0,037	TO-18	0,330	0,264	0,065	0,279	0,051
TO-08	0,330	0,200	0,347	0,123	0	TO-19	0,330	0,141	0,376	0,143	0
TO-09	0,330	0,196	0,347	0,117	0	TO-20	0,330	0,044	0,473	0,143	0
TO-10	0,330	0,233	0,403	0,024	0	VI-01	0,333	0	0,304	0,359	0
UR-01	0,333	0,533	0,133	0	0	VI-02	0,333	0,146	0,366	0,152	0
UR-02	0,666	0,278	0,056	0	0	VI-03	0,327	0,324	0,348	0	0
UR-03	0,333	0,177	0,362	0,124	0	UR-04	0,333	0,053	0,444	0,167	0

Uno de estos métodos es el de evaluación global Fuzzy (FCA por sus siglas en inglés). Este procedimiento puede mejorar la comprensión de los diversos procesos y fenómenos involucrados en las matrices ambientales. El FCA evalúa la significación de cada componente de un sistema en términos de pesos predeterminados y disminuye la complejidad (o falta de claridad) por medio de funciones de pertenencia (Chen et al., 2005) que conducen a una mayor sensibilidad analítica en comparación con técnicas de evaluación similares (Guleda et al., 2004). También resuelve los

problemas de contorno borroso y controla los efectos de error de seguimiento (Wang, 2002). En el presente estudio, el FCA se utilizó para estimar las variables relevantes que determinan la calidad del agua basado en la transformación difusa y el principio de máximo grado de pertenencia. Para utilizar este método, se partió del establecimiento de cinco clases de calidad de agua, las cuales corresponden a aquellas indicadas en el Decreto 33903-Minae-S: clase 1, sin contaminación; clase 2, contaminación incipiente; clase 3, contaminación moderada; clase 4, contaminación

Cuadro 5. Características estadísticas de los parámetros evaluados en las muestras de agua superficial en la subcuenca del río Virilla. 2006-2010.

Parámetro	Valor Coeficiente Skewness	Valor Coeficiente Kurtosis	Estadístico Shapiro-Wilk	Distribución Normal
pH	0,019	0,078	0,994	X
Turbiedad	4,183	20,754	0,512	
SS	2,977	10,757	0,618	
SST	6,242	49,02	0,402	
DQO	2,773	11,64	0,740	
DBO	3,21	16,25	0,696	
Cl ⁻	1,39	2,836	0,897	
SO ₄ ²⁻	0,959	0,968	0,947	X
NO ₃ ⁻	1,700	3,954	0,862	
Na ⁺	1,867	3,907	0,817	
K ⁺	0,743	0,938	0,959	X
P total	2,807	2,807	0,766	
NO ₃ ⁻	1,765	1,765	0,813	
NH ₄ ⁺	2,937	12,884	0,742	
Ca ²⁺	0,123	-0,777	0,970	X

alta y clase 5, contaminación muy alta. Cada uno de los 64 sitios de monitoreo se asoció con una clase de contaminación basada en los grados de pertenencia máximos derivados del FCA (cuadro 4). De acuerdo con el decreto 33903-Minae-S y la información sobre la condición ambiental del área de estudio, la calidad del agua de la clase 1 se considera limpia o de condición de baja contaminación (LP), la calidad del agua de clase 2 y 3 corresponde a contaminación moderada (MP), la calidad del agua de clase 4 y 5 se considera como contaminación alta (HP). Según el resultado del FCA, 27 sitios de monitoreo de la subcuenca fueron clasificados como LP, 22 sitios como MP y 13 sitios como HP, la mayoría de ellos estaban ubicados en los ríos afluentes de las zonas urbanas de alta densidad. La caracterización estadística de los sitios de muestreo estudiados se presenta en el cuadro 5.

De las variables fisicoquímicas evaluadas en las muestras recolectadas en los cuerpos de agua superficial, solamente el pH, Ca, K y SO₄²⁻ muestran una distribución normal. Para estas variables, se utilizó el análisis de varianza (Anova) con mínima diferencia significativa (LSD) para detectar aquellos parámetros que determinan las diferencias existentes

entre las tres zonas de contaminación (LP, MP y HP). En forma alternativa, para las variables que no presentan una distribución normal se empleó una prueba no paramétrica (U de Mann-Whitney) para detectar posibles diferencias (véase el cuadro

Cuadro 6. Medias registradas para los sitios de cada una de las categorías de contaminación en la subcuenca del río Virilla.

Variables	Zona	Media	Variables	Zona	Media
DQO (mg O ₂ /l)	LP	27,5	NO ₃ ⁻ (mg/l)	LP	3,73
	MP	59,1		MP	3,70
	HP	88,4		HP	5,15
SST (mg/l)	LP	11,43	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	LP	9,59
	MP	43,05		MP	13,29
	HP	112,74		HP	13,75
Turbiedad (NTU)	LP	4,29	Na ⁺ (mg/l)	LP	6,22
	MP	7,26		MP	8,42
	HP	15,64		HP	8,69
DBO (mg O ₂ /l)	LP	16,0	K ⁺ (mg/l)	LP	2,54
	MP	21,6		MP	2,95
	HP	19,6		HP	2,74
Cl ⁻ (mg/l)	LP	4,98	NO ₂ ⁻ (µg/l)	LP	65,4
	MP	7,36		MP	116,4
	HP	8,01		HP	268,7
SS (ml/l)	LP	0,10	NH ₄ ⁺ (µg/l)	LP	210
	MP	0,25		MP	619
	HP	0,30		HP	947

6). Al aplicar las pruebas anteriores se encontró que solamente cuatro variables: sólidos suspendidos totales (SST), nitrito, amonio y la demanda química de oxígeno (DQO) determinan la diferencia entre los sitios de baja y alta contaminación.

Principales fuentes de contaminación

Con el fin de identificar las principales fuentes de contaminación, se realizó un análisis de factor sobre los datos normalizados obtenidos para las tres

zonas de contaminación. El análisis de factor es un método estadístico multivariado que se puede utilizar para describir la variabilidad entre los parámetros observados en términos de un menor número de mensurandos no observados llamados factores (Tabachnick y Fidell, 2001). El análisis de factor se ha utilizado para evaluar una serie de indicadores de calidad del agua y su variación espacial (Wunderlin et al., 2001). Los resultados del análisis de factor junto con los tipos de fuentes probables se presentan en el cuadro 7. Según Liu et al. (2003), cargas factoriales > 0,75, (0,5-0,75) y (0,3-0,5) se consideran como fuertes, moderadas y débiles, respectivamente.

En la zona de LP, se obtuvieron dos varifactores que explican el 80,9 % de la varianza total (cuadro 7). El primer varifactor (VF1) representa el 54,4 % de la varianza total y presenta una fuerte correlación entre SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ y Cl^- que relaciona los factores naturales como la litología y los tipos de suelo. El segundo varifactor (VF2) definió el 26,5 % de la varianza total e incluyó la DQO, DBO y SST. Este

Cuadro 7. Factores varimax rotados para las distintas zonas de contaminación.

Parámetro	LP		MP		HP	
	VF1	VF2	VF1	VF2	VF1	VF2
pH	-0,099	0,181	-0,043	0,269	-0,202	-0,187
Turbiedad	0,719	0,424	0,400	0,664	0,332	-0,164
SS	0,043	0,038	-0,122	0,858	0,006	0,133
SST	0,115	0,734	-0,030	0,897	0,716	-0,193
DQO	0,088	0,859	0,291	0,768	0,947	-0,146
DBO	0,114	0,835	0,368	0,752	0,874	0,339
Cl^-	0,900	0,296	0,847	0,242	-0,006	0,925
SO_4^{2-}	0,681	0,117	0,765	0,212	0,044	0,852
NO_3^-	0,244	0,765	0,730	-0,295	-0,027	-0,281
Na^+	0,860	-0,067	0,786	0,067	0,298	0,886
K^+	0,915	-0,041	0,573	0,372	0,059	0,907
P Total	0,492	0,152	0,364	0,520	0,928	0,123
NO_2^-	0,836	0,088	0,428	0,579	0,702	0,466
NH_4^+	0,644	0,504	0,426	0,641	0,824	0,247
OD	0,120	0,379	0,087	0,301	-0,643	0,127
% Varianza explicada	54,4 %	26,5 %	41,3 %	35,8 %	48,9 %	18,9 %

factor representa múltiples fuentes de contaminación y puede ser generado principalmente por la escorrentía urbana y aguas residuales industriales.

En la zona de MP, el VF1 explicó el 41,3 % de la varianza total y presentó cargas fuertes en SO_4^{2-} , NO_3^- , Na^+ , Cl^- y una carga débil en K^+ y NH_4^+ . Este factor representa la contaminación difusa de origen, asociado con la producción agrícola y la influencia del tipo de suelo. El VF2 definió el 35,8 % de la varianza total y tenía cargas fuertes de DBO, sólidos sedimentables, SST y moderados en el fósforo total, NH_4^+ y NO_2^- . Las correlaciones de dichos nutrientes apoyan el argumento de que la eutrofización es un problema de calidad del agua en esta zona debido a la escorrentía de las aguas residuales urbanas.

En la zona de HP, el VF1 justificó el 48,9 % de la varianza total y tenía cargas fuertes en DQO, DBO, SST, TP, NH_4^+ y NO_2^- . Este factor podría ser interpretado como la influencia de la contaminación de fuente puntual, como los vertidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales y efluentes

industriales. El VF1 presentó una carga negativa muy fuerte para el oxígeno disuelto, lo que indica que la calidad del agua en la zona de HP ha sido seriamente degradada por la presencia de extensas condiciones anaeróbicas causadas por el agotamiento de oxígeno debido a la descomposición de material orgánico. El VF2 definió el 18,9 % de la varianza total y tenía cargas fuertes en SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ y Cl^- .

Variaciones temporales de la contribución de cada fuente de contaminación

Las contribuciones de cada fuente a las distintas variables de la calidad del agua durante el tiempo de muestreo se calcularon utilizando la herramienta Unmix. El análisis de factor puede ofrecer una valiosa información

cualitativa acerca de las fuentes potenciales de contaminación, pero no puede proporcionar información cuantitativa adecuada sobre la contribución de cada fuente de contaminación a las variables de calidad del agua, de interés para cada sitio de monitoreo.

Unmix puede estimar las contribuciones de cada fuente de contaminación a través del análisis gráfico y modelado de receptor multivariable basado en el análisis de componentes principales (PCA) (Miller et al., 2002). En este estudio, Unmix supone una relación lineal entre los datos medidos y las fuentes cuyo número y composición son desconocidos.

Para los sitios de monitoreo catalogados de baja contaminación, la DBO, DQO y SST fueron

influenciados principalmente por la contaminación proveniente de fuentes no puntuales, mientras que en el caso del Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ y K^+ los factores naturales resultaron predominantes.

Los parámetros de la zona de MP fueron influenciados principalmente por múltiples fuentes de contaminación provenientes de escurrimientos y aguas

Cuadro 8. Porcentaje de contribución de cada fuente en cada sitio de monitoreo de la subcuenca del río Virilla.

Sitio de muestreo	Fuente 1 (*)	Fuente 2 (**)	Fuente 3 (***)	Sitio de muestreo	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3	Sitio de muestreo	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3
BE-01	75,4	17,6	3,3	MA-01	48,5	36,3	7,1	TO-05	21,7	68,8	-
BE-02	67,3	15,8	2,7	MA-02	41,1	44,9	3,6	TO-06	29,5	60,3	-
BE-03	64,7	20,2	1,1	PA-01	27,7	57,5	4,4	TO-07	45,7	31,2	11,6
BE-04	38,9	47,5	2,8	PA-02	21,8	60,2	-	TO-08	32,1	65,4	-
BE-05	27,9	50,4	-	PA-03	27,5	63,9	-	TO-09	47,6	40,1	-
BE-06	47,0	51,3	-	PA-04	19,9	68,7	-	TO-10	55,5	39,7	-
BE-07	32,6	44,8	-	PA-05	24,6	62,9	-	TO-11	48,7	40,5	-
BE-08	38,2	54,3	-	PAR-01	42,1	38,7	12,5	TO-12	37,5	49,7	-
BE-09	41,2	55,5	-	PAR-02	44,8	30,9	15,4	TO-13	23,5	50,7	13,2
CI-01	78,8	14,1	6,3	RS-01	47,5	32,1	19,0	TO-14	19,9	62,5	10,3
CI-02	65,4	16,6	4,8	RS-02	40,7	42,8	7,7	TO-16	37,6	55,3	-
CI-03	53,2	32,1	5,5	RS-03	22,5	57,8	-	TO-17	40,5	57,9	-
CI-04	37,6	49,5	-	RS-04	27,4	60,2	-	TO-18	29,7	60,8	-
DU-01	29,8	59,6	-	TIB-01	51,3	32,9	8,4	TO-19	38,6	52,9	-
DU-02	33,1	64,9	-	TIB-02	42,4	38,5	3,9	TO-20	28,9	54,4	-
IP-01	68,9	24,7	-	TIB-03	33,2	49,7	7,2	UR-01	31,5	57,2	-
IP-02	75,4	13,3	6,4	TO-01	31,8	52,8	10,2	UR-02	27,6	64,9	-
JA-01	38,7	45,4	9,1	TO-02	36,9	26,7	15,5	UR-03	52,7	39,6	-
JA-02	31,8	56,7	5,2	TO-03	20,4	65,8	-	VI-01	21,5	65,6	-
PI-01	47,6	38,6	8,3	TO-04	26,8	55,6	11,1	VI-02	14,2	73,9	-

(*) Fuente 1: Factores naturales como litología y tipo de suelo.

(**) Fuente 2: Descarga de aguas residuales urbanas e industriales.

(***) Fuente 3: Fuentes no puntuales de contaminación asociadas con la producción agrícola.

Cuadro 9. Evolución de la contribución de fuentes (%) en las microcuencas del río Virilla. 2006-2009.

Río	2006		2007		2008		2009	
	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 1	Fuente 2
Bermúdez	23,2	62,5	19,6	68,8	16,4	73,9	15,2	76,4
Segundo	29,5	54,9	27,3	58,2	27,1	61,0	29,5	64,0
Ciruelas	37,9	58,7	35,2	60,3	32,4	64,7	30,1	66,8
Tibás	31,6	52,9	32,8	50,3	35,4	47,2	37,3	44,2
Macho	27,5	66,4	25,1	67,8	23,0	69,2	22,1	70,7
Torres	19,6	71,2	18,4	73,6	17,0	75,3	15,0	78,3
Pacacua	14,3	76,8	13,0	79,5	12,5	80,2	11,3	83,1
Uruca	11,9	68,4	10,3	70,1	9,9	73,7	8,0	79,2
Picagres	27,3	72,2	23,9	74,8	15,4	77,1	11,7	84,3
Ipis	22,1	66,3	19,5	69,3	16,8	73,8	14,2	81,6

residuales industriales (porcentaje de contribución de 85,6 % para la DBO, el 84,7 % por DQO y el 87,8 % por SST, respectivamente).

En la zona de HP, las contribuciones porcentuales correspondientes se encuentran asociadas principalmente a los contaminantes provenientes de las actividades industriales y urbanas (92,4 %, 95,4 %, 96,9 % y 88,6 % de la DBO, DQO, SST, NH_4^+ , respectivamente). La contribución de las fuentes estimada para cada sitio de muestreo se evidencia en el cuadro 8.

Al analizar la evolución de las contribuciones de cada fuente en el período 2006-2010 (cuadro 9), se puede notar que para algunas microcuencas, como Torres, Bermúdez y Segundo, se mantiene una tasa de crecimiento de 8,7 % en las contribuciones de origen antropogénico como las descargas de aguas residuales, tanto domésticas como industriales. En este caso, los parámetros que más contribuyeron fueron DQO, DBO, SST y amonio, cuya tasa aumenta entre un 8 y un 19 % anualmente.

Conclusiones

- Alrededor del 56 % de los sitios de muestreo distribuidos en la subcuenca del río Virilla muestran niveles de contaminación de moderado a severo.
- Los sitios que presentan contaminación de moderada a grave se caracterizan por altas concentraciones de DQO (60-85 mg O_2/l), SST (43 a 113 mg/l), nitrito y amonio.
- La mayoría de los sitios severamente contaminados se encuentran en las microcuencas de los siguientes ríos: Torres (7), Pacacua (3), La Uruca (2) y Virilla (1).
- Las fuentes principales que explican las variaciones en la composición química de los cuerpos de agua de la subcuenca son: el aporte de minerales provenientes del tipo de suelo, la carga de sedimentos y las descargas de aguas residuales no tratadas.
- La tasa de contaminación en los cuerpos de agua de esta cuenca están aumentando de manera positiva en los últimos 5 años, con una tasa anual entre 5 y 17 %.
- El incremento se debe principalmente a la importante contribución de las fuentes antropogénicas, tales como el vertido de aguas residuales sin tratamiento.

Referencias

- Alvarado, A., y Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(2), 167-168.
- Bhaduri, B., Minner, M., Tatalovich, S. y Harbor, J. (2001). Long-term hydrologic impact of urbanization: A table of two models. *Journal of Water Resources Planning and Management* 127(1), 13-19.
- Bricker, O. P., Jones, B.F. (1995). Main factors affecting the composition of natural waters. En: B. Salbu y E. Steinnes (Eds.). *Trace elements in natural waters* (p. 1-5). Boca Raton: CRC Press.
- Campbell, D., Bergman, M., Brody, R., Keller, A., Livingston-Way, P., Morris, F. y Watkins, B. (1993). *SWIM Plan for the Lower St. Johns River Basin. St. River Water Management District*. Palatka, Florida.
- Chen, H. W., Chang, N. B. y Shaw, D. (2005). Valuation of in-stream water quality improvement via fuzzy contingent valuation method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 19(2), 158-171.
- Guleda, O. E., Ibrahim, D. y Halil, H. (2004). Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation. *Atmospheric Environment* 38(23), 3809-3815.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2001). *IX Censo Nacional de Población y V de Vivienda del 2000: Resultados Generales*. San José. 80 p.
- Kowalkowski, T., Zbytniewski, R., Szpejna, J. y Buszewski, B. (2006). Application of chemometrics in river water classification. *Water Research* 40(4), 744-752.
- Liu, C. W., Lin, K. H. y Kuo, Y.M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a Blackfoot disease area in Taiwan. *Science in the Total Environment* 313(1-3), 77-89.
- Miller, S. L., Anderson, M. J., Daly, E. P. y Milford, J. B. (2002). Source apportionment of exposures to volatile organic compounds I: Evaluation of receptor models using simulated exposure data. *Atmospheric Environment* 36(22), 3629-3641.
- Pekey, H., Karakas, D. y Bakoglu, M. (2004). Source apportionment of trace metals in surface waters of a polluted stream using multivariate statistical analyses. *Marine Pollution Bulletin* 49(9-10), 809-818.
- Ren, W., Zhong, Y., Meligrana, L., Anderson, B., Watt, W.E., Chen, J. y Leung, H.L. (2003). Urbanization, land use and water quality in Shanghai 1947-1996. *Environment International* 29(5), 649-659.
- Tabachnick, B.G. y Fidell, L.S. (2001). *Using Multivariate Statistics*. Boston, MA: Allyn and Bacon.
- Vega, M., Pardo, R., Barrado, E. y Deban, L. (1998). Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Water Research* 32, 3581-3592.
- Wang, H.Y. (2002). Assessment and prediction of overall environmental quality of Zhuzhou City, Hunan Province, China. *Journal of Environmental Management* 66(3), 329-340.
- Wunderlin, D.A., Díaz, M.P., Ame, M.V., Pesce, S.F., Hued, A.C. y Bistoni, M.A. (2001). Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia river basin (Córdoba, Argentina). *Water Research* 35(12), 2881-2894.
- Xian, G., Crane, M. y Junshan, S. (2007). An analysis of urban development and its environmental impact on the Tampa Bay watershed. *Journal of Environmental Management* 85(4), 965-976.