

Impacto de las aguas residuales domésticas e industriales potencialmente contaminadas en los suelos irrigados agrícolas en clima ecuatorial; caso Villavicencio -Colombia

Juan Manuel Trujillo-González¹, Juan David Mahecha-Pulido¹, Marco Aurelio Torres-Mora¹, Eric Brevik², Saskia Keesstra³, Raimundo Jiménez-Ballesta⁴

¹Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana ICAOC, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos, Campus Barcelona Villavicencio, Colombia
jtrujillo@unillanos.edu.co, juandmahechap@gmail.com, mtorres38@gmail.com

²Department of Natural Sciences, Dickinson State University, Dickinson, ND, USA
eric.brevik@dickinsonstate.edu

³Soil Physics and Land Management Group, Wageningen University, Droevendaalsesteeg 4, 6708PB Wageningen, The Netherlands saskia.keesstra@wur.nl

⁴Dept. of Geology and Geochemistry. Universidad Autónoma. 28049, Madrid. Spain.
raimundo.jimenez@uam.es. Tf. 34-914974810

RESUMEN

A nivel mundial, se estima que 20 millones de hectáreas de tierras de cultivo se riegan con aguas que contiene residuos líquidos. Esto plantea potencialmente riesgos para la salud pública y los ecosistemas, especialmente debido a contaminantes como los metales pesados, que son considerados peligrosos debido a su potencial toxicidad y persistencia en el medio ambiente. La región de Villavicencio (Colombia) se ubica en la región ecuatorial donde la precipitación (cerca de 3000 mm / año) y la temperatura (media 25.6°C) son altas. En el presente estudio se planteó como objetivo analizar los efectos del riego con aguas potencialmente contaminadas sobre los suelos agrícola. Para esto, se analizaron las propiedades del suelo de los campos agrícolas irrigados con efluentes de aguas residuales y se compararon con los suelos de control no irrigados. En este estudio, no se encontraron alteraciones físico-químicas que evidenciaran un cambio debido al uso constante de aguas residuales. Este hecho puede estar asociado con los factores climáticos (temperatura y precipitación), que contribuyen a la rápida degradación de la materia orgánica y nutrientes y contaminantes (tales como metales pesados) lixiviación.

PALABRAS CLAVES: Tierras agrícolas, aguas residuales, irrigación de suelos

Impacto de las aguas residuales domésticas e industriales potencialmente contaminadas en los suelos irrigados agrícolas en clima ecuatorial; caso Villavicencio -Colombia

Juan Manuel Trujillo-González¹, Juan David Mahecha-Pulido¹, Marco Aurelio Torres-Mora¹, Eric Brevik², Saskia Keesstra³, Raimundo Jiménez-Ballesta⁴

¹Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana ICAOC, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos, Campus Barcelona Villavicencio, Colombia
jtrujillo@unillanos.edu.co, juandmahechap@gmail.com, mtorres38@gmail.com

²Department of Natural Sciences, Dickinson State University, Dickinson, ND, USA
eric.brevik@dickinsonstate.edu

³Soil Physics and Land Management Group, Wageningen University, Droevendaalsesteeg 4, 6708PB Wageningen, The Netherlands saskia.keesstra@wur.nl

⁴Dept. of Geology and Geochemistry. Universidad Autónoma. 28049, Madrid. Spain.
raimundo.jimenez@uam.es. Tf. 34-914974810

INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos se relaciona principalmente por las prácticas culturales. Los vertimientos de aguas residuales municipales domésticas e industriales, se remonta 400 años atrás y actualmente es una práctica común en diferentes lugares del mundo (Reed et al., 1995). A nivel mundial, se estima que 20 millones de hectáreas de tierra cultivable se riegan con aguas que tienen aportes residuales líquidos domésticos sin tratamiento o con tratamientos deficientes (Wuana y Okieimen, 2011; Fatta-Kassinos et al. 2011; Aydin et al. 2015). Sobre esta realidad, algunos autores plantean el riesgo para la salud pública y los ecosistemas, especialmente por los contenidos de metales pesados, considerados peligrosos debido a su toxicidad y persistencia en el ambiente (Manpanda et al. 2005; Alobaidy et al., 2010; Qadir et al., 2015); asimismo, las ventajas en reducción de fertilizantes motivan a los agricultores a usar esta agua para el riego de los cultivo, además de ser una alternativa ambientalmente aceptada para la eliminación de vertimientos (Fatta-Kassinos et al., 2011; Kim et al. 2015; Aydin et al. 2015).

Los metales pesados y elementos traza en el sistema suelo, son temas que cada vez cobran mayor interés por parte de organismos públicos y privados (Rahman et al., 2012). Metales pesados como Cu, Zn, Mn, Fe, y Mo, han sido identificados como micronutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, mientras que el Cd, Pb, Cr⁶⁺, Ni, Hg y As, además de no ser esenciales para las plantas, tienen efectos tóxicos, incluso en concentraciones muy bajas (Simmons et al., 2010; Pulido et al. 2013). La acumulación de los metales pesados en los suelos de uso agrícola puede afectar la cadena alimentaria al transferirse en la matriz suelo-planta-hombre (Gupta et al. 2010). Los niveles de metales pesados en suelos varían entre regiones y dependen del material parental, y de las aplicaciones constantes de fertilizantes que contienen traza de estos elementos (Wang y Zang 2014). La concentraciones de metales pesados en aguas residuales son bajas, pero su uso prolongado aumenta la posibilidad de acumulación, de contaminación del suelo y aguas subterráneas, y de transferencia de los contaminantes a las plantas (Rattan et al. 2005; Abdu et al. 2011). Las aguas residuales pueden contener residuos de origen industrial, doméstico y de escorrentía urbana (Alobaidy et al., 2010). Guedron et al., (2014), reporta que en aguas residuales no tratadas las concentraciones de Pb y metilmercurio pueden alcanzar los 0.16±0.05 mg/L y 3,8±2,5 ng/L respectivamente.

En este sentido, el continuo uso de éste tipo de agua pone en riesgo el recurso suelo, concebido tradicionalmente como el medio natural soporte para la producción de alimentos (FAO, 2015), pero también es soporte de todas las actividades antrópicas. El suelo es un ente dinámico que cumple cinco funciones biofísicas principales: ciclado de nutrientes; retención de agua; biodiversidad y hábitat; almacenamiento, filtrado, amortiguación y transformación de compuestos; y estabilidad física y soporte (Blum, 1993), funciones todas fundamentales para el desarrollo de las sociedades y para la determinación de la calidad ambiental (Koch et al., 2013; Pla, 2014).

El crecimiento de la población, el aumento en la demanda de bienes y servicios, y las prácticas inadecuadas especialmente en las labores agrícolas, son factores que determinan la degradación del suelo (Pla, 2014). Todos estos factores establecen la necesidad de construir programas de monitoreo, especialmente en terrenos agrícolas ubicados en áreas periurbanas que aprovechan aguas contaminadas con residuos domésticos e industriales para su irrigación, y establecer de esta manera medidas en procura de su conservación y/o remediación, especialmente en regiones en vías de desarrollo, donde existe carencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas y pluviales, y donde la actividad industrial es elevada (Aurora et al., 2008).

En el presente estudio se plantearon como objetivos identificar las diferentes fuentes de contaminantes que recibe el río Ocoa, fuente hídrica que atraviesa el área urbana de la ciudad de Villavicencio - Colombia, y el efecto sobre las condiciones físico-químicas de un suelo irrigado con estas aguas. La evaluación de estos aspectos son una herramienta científica eficaz que permitirá a los tomadores de decisiones gestionar sitios contaminados, preservando la salud pública y la de los ecosistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se realizó en un terreno agrícola irrigado con aguas provenientes del río Ocoa que recoge efluentes de diferentes fuentes. Ubicado en las coordenadas geográficas 4°6'0" Norte - 73°14'0" Oeste y 4°7'30" Norte - 73°16'30" en el municipio de Villavicencio, localizado en el centro oriente de Colombia a 243 msn m, con temperatura promedio anual de 25,7 °C y una precipitación promedio anual 2888,8 mm (Estación meteorológica La Liberta –Código 35025020 -IDEAM) el riego se aplica en los meses de menor oferta de aguas lluvia (Figura 1). La precipitación en la región está determinada en gran medida por la zona de convergencia intertropical, con un régimen monomodal, donde los meses de abril, mayo, junio, julio y octubre presentan las mayores precipitaciones con valores que van desde 305,8 a 431,6 mm/mes y la temporada seca en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo con precipitaciones que varían entre 25,1 y 147 mm/mes, la clasificación climática de la región corresponde a bosque húmedo tropical (IGAC, 2004). Los suelos en el área de estudio están dominados por Inceptisoles y Oxisoles según la clasificación del sistema Soil Taxonomy EE.UU. De acuerdo con Goosen, 1971, a menudo se traducen en Cambisoles o Ferralsoles en el sistema de la FAO-ISRIC-ISSS.

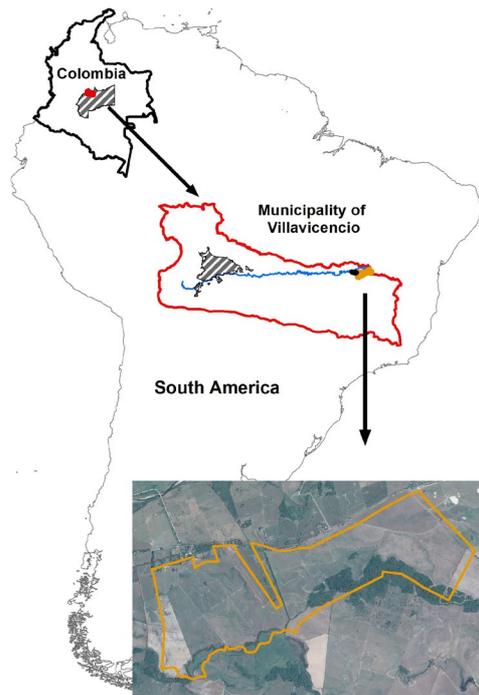


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio

Fuentes de vertimientos al río

La identificación de las fuentes de vertimiento sobre el río Ocoa, comprendió actividades que incluyeron: recorridos de campo, entrevistas a los habitantes, registros fotográficos y georreferenciación (con el uso de GPS Garmin 62SC). En los puntos donde se encontró numerosos vertimientos sobre el río, se referenció como zona común de descarga.

Muestreo de suelos

Se tomaron un total de 21 muestras de suelo a una profundidad de 0 a 30 cm considerada como la zona de importancia agrícola y donde se acumulan los elementos contaminantes, según lo expone Micó et al., (2006). El muestreo fue sistemático en cruz, es decir cada uno de los puntos de muestreo están a distancias uniformes, cubriendo la totalidad del área. Cada muestra estuvo compuesta por cinco sub-muestras y los puntos de muestreo fueron ubicados con el software ArcGis 10.1, y luego en terreno se localizaron con ayuda de un GPS Garmin 62 SC.

Análisis de laboratorio

La determinación de las concentraciones de los metales pesados (Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) se realizó de acuerdo con el método de digestión de ácido nítrico, ácido clorhídrico y peróxido de hidrogeno y espectrofotometría de absorción atómica con llama Aire – Acetileno, EPA 3050B, SM 3111B. El pH se midió con potenciómetro en relación 1:1 suelo: agua; la materia orgánica (MO) se determinó por el método de Walkley-Black; el fósforo disponible mediante Bray II; las bases intercambiables Ca, Mg, Na, K por extracción con acetato de amonio normal (pH 7.0); el Ca y Mg cuantificados por

absorción atómica; el Na y K por espectrofotometría de emisión atómica y el análisis granulométrico por el método de Bouyoucos (IGAC, 1990).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fuentes de vertimientos al río Ocoa

A lo largo del río Ocoa se identificaron 54 puntos con vertimientos de fuentes domésticas, agropecuarias e industriales (Figura 2), y tan solo 15 (27,8 %) de estos contaban con autorización para el vertimiento de residuos líquidos, mientras que para los restantes (72,2 %) no fue posible establecerle si contaban con autorización por parte de la autoridad ambiental. Sin embargo, en ninguno de los dos escenarios se realiza algún tipo de tratamiento para la remediación de la calidad del agua, superando lo mencionado por UN WATER (2008), sobre que en los países en vías de desarrollo alrededor del 90% de los vertimientos no cuentan con tratamiento. Asimismo, se identificó que el 79,64% de los puntos de vertimiento corresponden a fuentes domésticas, en algunos sectores un punto corresponde a una “*zona común de vertimiento doméstico*” por los numerosos efluentes. En los países en desarrollo los problemas de contaminación de las aguas debido a la falta de saneamiento básico se relaciona principalmente con sectores vulnerables de la población, que han tenido como única opción establecerse en periferias o riberas de las fuentes hídricas (ríos–Quebradas), que los abastecen de servicios ambientales como: agua para preparar alimentos, higiene personal, lavado de ropa, recreación y alcantarillado (Chaggu et al 2002; Qadir et al., 2010). En el municipio de Villavicencio –Colombia, las aguas residuales domésticas son concentradas y conducidas a puntos de vertido sin hacer tratamiento; sin embargo, no todas las viviendas están conectadas a la red de aguas residuales, pues cuentan con sistemas de pozo séptico o simplemente se vierte de forma directa a una fuente natural. Por otro lado, se identificó que el 16,66% corresponde a vertimientos mixtos compuestos de fuentes de escorrentía urbana, agroindustria y lavadero de automóviles. La actividad industrial de producción de hidrocarburos aporta el 1,85% de las fuentes de vertimiento, y según Ecopetrol (2014), los compuestos orgánicos e inorgánicos que se vierten en las aguas residuales al río Ocoa, mantienen niveles por debajo de lo estipulado por la norma ambiental colombiana vigente. El último aporte encontrado (1,85%) corresponde a un relleno sanitario municipal clausurado, que según autores como Krook et al., 2012 y Abu-Daabes et al., 2013, generan emisiones atmosféricas y lixiviados con cargas orgánica e inorgánicas entre ellos metales pesados.

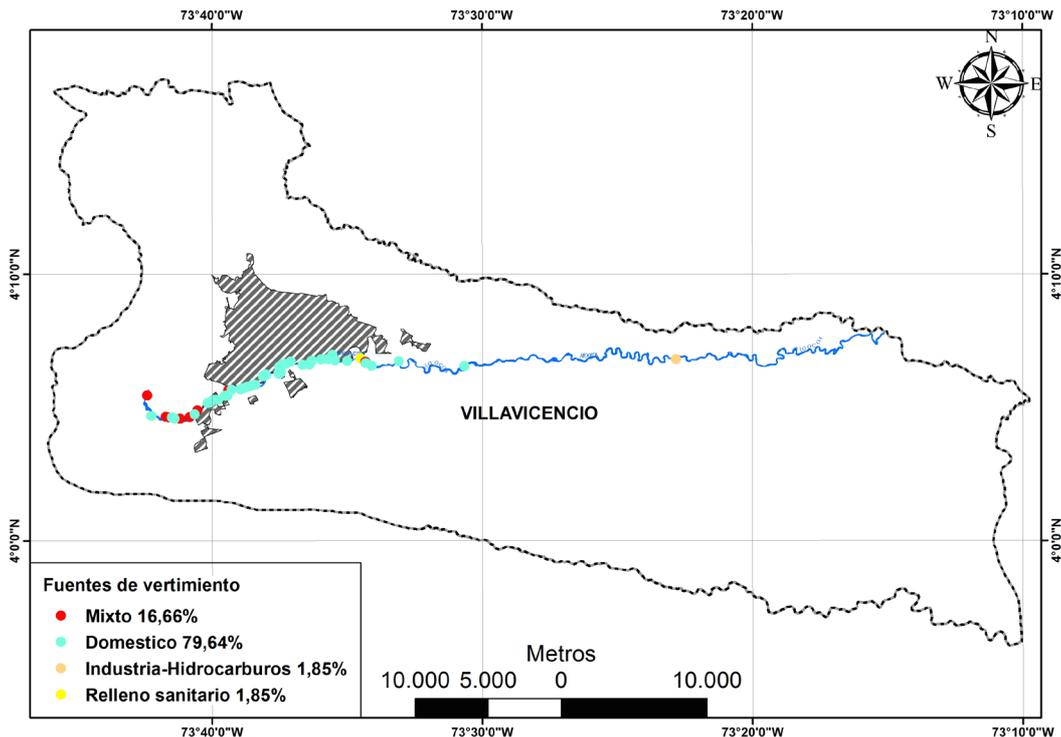


Figura 2. Distribución y fuente de vertimientos al río Ocoa.

La falta de recursos financieros y alto costo de la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, la debilidad en la gobernanza de las instituciones centrales y locales, la limitada capacidad institucional y técnica, y la prioridad por ampliar suministro de agua antes que ampliar y/o implementar tratamiento de aguas residuales, son factores que contribuyen a que la gestión de las aguas residuales especialmente domésticas, sea una estrategia de largo plazo principalmente en los países en desarrollo (WHO, 2006; Qadir et al., 2015). Las aguas residuales industriales a menudo contiene niveles elevados de metales, metaloides, compuestos volátiles, entre otro contaminantes inorgánicos, mientras que en las aguas residuales domésticas el riesgo se asocia a la carga patógenos que incluyen virus, bacterias, protozoos y parásitos multicelulares (Bos et al., 2010). Los consumidores e instituciones del gobierno desconocen los riesgos potenciales sobre la salud humana y los ecosistemas, ocasionados cuando estos componentes están por encima de los límites permisibles (WHO, 2006; Trang et al., 2007; Qadir et al., 2010; Guénon et al. (2014). En general en los países en desarrollo, las entidades gubernamentales encargadas de gestionar el buen uso de los recursos naturales, carecen de herramientas que les permita determinar la capacidad de carga que tienen la fuentes hídricas para recibir y depurar de forma natural las aguas residuales (Qadir et al 2015).

Basados en lo anterior, el agua del río Ocoa en el municipio de Villavicencio, contiene cargas orgánicas e inorgánicas, provenientes de los distintos vertimientos directos de fuentes domésticas, mixtas e industriales, que pueden afectar la salud de las comunidades humana, de los ecosistemas asociados y especialmente puede alterar las propiedades de los suelos agrícolas irrigados por largo tiempo (Brindha y Elango, 2014).

Condiciones fisicoquímicas

Análisis granulométrico

La distribución granulométrica del suelo define la capacidad de retención de nutrientes y de agua. Las características encontradas para el suelo en la zona de estudio presentó porcentajes de Arena, Limo y Arcilla que variaron entre 20,4 - 42,7; 25,6 - 43,6 y 23,4 - 41,7 con media \pm desviación estándar de $33,23 \pm 5,8$; $33,6 \pm 4,9$ y $33,17 \pm 4,6$ respectivamente. Una vez llevado a cabo el análisis granulométrico y realizada la clasificación textural mediante el triángulo de texturas del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Soil Survey Staff, 1951), la clase textural presente en el área de estudio es la Franco arcillosa, coincidente con el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras, Departamento del Meta (IGAC, 2004), donde lo describe como suelos del complejo Typic Tropofluvents, de texturas medias a finas, con déficit de aireación periódica como lo demuestran la presencia de moteados grises y marrones señal de drenaje moderado a pobre, susceptibles a inundaciones y de profundos a muy superficiales, fuertemente ácidos y de fertilidad baja (McKeague et al., 1987; Reynolds et al., 2014).

Análisis químico

En la tabla 1, se presenta los resultados de la estadística descriptiva de parámetro químicos. El contenido de materia orgánica (MO) en promedio fue de 1,45% variando entre 1 y 2%, siendo el principal responsable del color oscuro del suelo y que juega un papel fundamental en la formación de agregados, control de la acidez, reciclaje de elementos metálicos y en la desintoxicación de suelos por uso de plaguicidas (Zapata, 2004); el pH varió entre 4 y 5,1 con un valor medio de 4,52 clasificando al suelo como *muy fuertemente ácidos*, de acuerdo con Soil survey staff (1993).

Tabla 1. Estadística descriptiva y el análisis de la diferencia t-test Studens del área de interés y el área de referencia para la materia orgánica (OM,%), fósforo disponible (P, ppm), pH, Aluminio (Al, meq / 100g suelo) Bases (CA), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na) meq / 100 g de suelo.

		OM	P	pH	Al	Ca	Mg	K	Na
Área de interés de este estudio	Media	1.5 ^{NS}	8.5 ^{NS}	4.5 ^{NS}	1.1 ^{NS}	1.2 ^{NS}	0.3 ^{NS}	0.2 ^{NS}	0.1 ^{NS}
	Mínimo	1	0.8	4	0.5	0.2	0.01	0.07	0.04
	Máximo	2	32.5	5.1	2.6	2.2	0.6	0.4	0.1
	Desviación estándar	0.3	8.76	0.28	0.57	0.52	0.17	0.07	0.03
	Coefficiente de variación %	19.4	103.6	6.2	49.7	42.2	68.4	44.1	34.1
	Número de muestras	21	21	21	21	21	21	21	21
Área de referencia	Media	1.4 ^{NS}	2.5 ^{NS}	3.9 ^{NS}	1.2 ^{NS}	0.3 ^{NS}	0.2 ^{NS}	0.1 ^{NS}	0.06 ^{NS}
T-student test		0.998	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	0.998

Ns= No Significativa

El Al³⁺ alcanzó un promedio de 1,15 meq/100g suelo y las bases intercambiables estuvieron en promedio en Ca²⁺ (1,22 meq/100g), Mg²⁺ (0,26 meq/100g), K (0,16 meq/100g) y Na (0,08 meq/100g). El fósforo intercambiable presentó una media de 8,45 ppm variando entre 0,8 y 32,5 mostrando una alta heterogeneidad con un coeficiente de variación de 103,6%. Sin embargo, esto se debe a que los mayores

contenidos de fósforo en el suelo se presentaron en el área donde hubo actividad agrícola reciente, mientras que los menores valores se presentaron en terrenos sin actividad agrícola en el último año, consistente con Sommer (2006) quien plantea que la heterogeneidad del suelo se relaciona con las diferencias en el material parental, clima, topografía y/o a con las practicas de manejo. Asimismo, Sinigani et al. (2005) afirma que la variabilidad del suelo superficial se debe a las prácticas agrícolas, mientras que la variación en horizontes del subsuelo se rige a procesos pedogenéticos. De los metales pesados considerados en el presente estudio, el Zn presentó una media de 65,3 mg/Kg, mientras que el Cu, Ni, Cd y Pb alcanzaron los 4,44; 1,3; 3,73 y 6,58 mg/Kg respectivamente, los límites de cuantificación por debajo de los valores donde estos metales son fitotóxicos (Kabata y Mukherjee, 2007). En estos suelos era probable determinar altas concentraciones de estos elementos metálicos debido a que las aguas de riego reciben vertimientos doméstico e industriales (Manpanda et al. 2005; Alobaidy et al., 2010; Klay et al., 2010), además del tiempo que han sido utilizadas en estos terrenos. En general las condiciones químicas de estos suelos son similares a las determinadas por Rincón y Caicedo (2010), Jamiroy-Orozco et al. (2015) y Niño y Navarro (2015), consideradas típicas para suelos del Piedemonte llanero de Colombia (Figura 3).

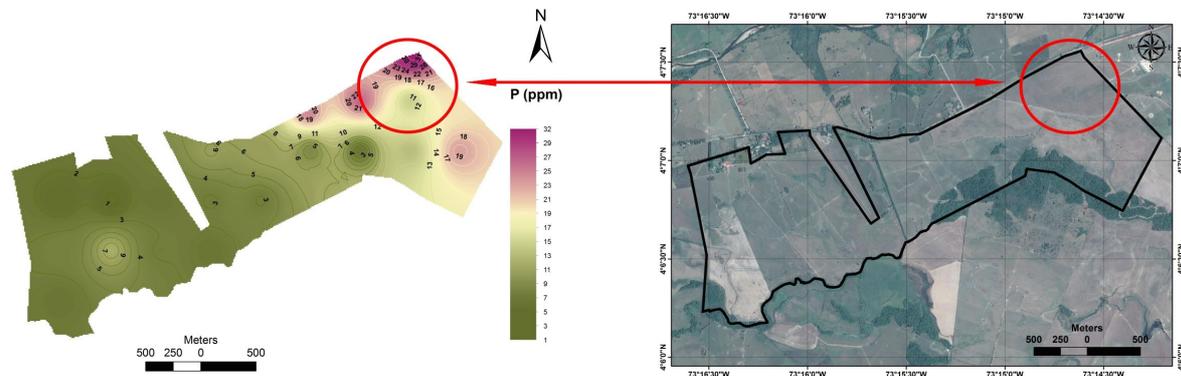


Figura 3. Distribución del fósforo (P) en profundidad de 0 – 30 cm (izquierda), imagen satelital – google earth enero 2015 (derecha).

Finalmente, aunque estos suelos presentan texturas FAr, relacionadas con suelos ricos en nutrientes, y además del riego con aguas altas en carga orgánica, estos presentan bajos contenidos de nutrientes y en el tema de metales pesados no se presenta acumulación o los valores no alcanzas los límites de cuantificación. Esto se puede explicar considerando las condiciones climáticas tal como lo plantea Yang et al. (2014) y Azouzi et al. (2015), donde las altas temperaturas durante todo el año inducen a la rápida oxidación de la materia orgánica, además el régimen de lluvias que presenta la zona de estudio facilita el lavado de nutrientes y elementos contaminantes como los metales pesados.

CONCLUSIONES

El río Ocoa recibe gran parte de las aguas residuales del municipio de Villavicencio a través de los sistemas conducción del municipio y de los habitantes de las riberas y periferias que tienen sus propios sistemas que pueden ser unitarios o comunitarios. Aunque esta agua es empleada para riego, los suelos estudiados no presentan alteraciones fisicoquímicas que puedan dar evidencia de algún cambio por el uso constante de estas aguas contaminadas, sin embargo esto puede estar asociado a

los factores climáticos (Temperatura y precipitación), que contribuyen en la degradación de la materia orgánica y en el lavado de nutrientes y elementos contaminantes como los metales pesados. Asimismo, con el comportamiento del fósforo se demuestra que las actividades agrícolas recientes son determinantes al momento de evaluar las condiciones fisicoquímicas de estos suelos. Finalmente es necesario establecer valores de referencia propios para la región y estrategias de monitoreo que permita evaluar los cambios geoquímicos especialmente en suelos irrigados con aguas cargadas de efluentes de diversas fuentes.

AGRADECIMIENTOS

Al fondo social de educación para la educación superior "FSES" por las becas otorgadas a los dos primeros autores y a la alianza Ecopetrol-Unillanos en el marco del convenio 5211592 por la financiación de las pruebas de laboratorio.

REFERENCIAS

1. Abdu, N., Abdulkadir, A., Agbenin, J. O., & Buerkert, A. (2011). Vertical distribution of heavy metals in wastewater-irrigated vegetable garden soils of three West African cities. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 89(3), 387-397
2. Abu-Daibes, M., Qdais H and Alsyouri, H., 2013. "Assessment of Heavy Metals and Organics in Municipal Solid Waste Leachates from Landfills with Different Ages in Jordan," *Journal of Environmental Protection*, Vol. 4 No. 4, pp. 344-352. doi: 10.4236/jep.2013.44041.
3. Alobaidy AHMJ, AL-Sameraiy MA, Kadhem AJ, Abdul-Majeed A (2010) Evaluation of treated municipal wastewater quality for irrigation. *J Environ Prot* 1:216–225
4. Arora, M., Kiran, B., Rani, S., Rani, A., Kaur, B., & Mittal, N. (2008). Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources. *Food Chemistry*, 111(4), 811-815.
5. Aydin, M. E., Aydin, S., Beduk, F., Tor, A., Tekinay, A., Kolb, M., & Bahadir, M. (2015). Effects of long-term irrigation with untreated municipal wastewater on soil properties and crop quality. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-10
6. Azouzi, R., Charef, A., Khadhar, S., Shabou, N., Boughanmi, H., Hjiri, B., & Hajjaj, S. (2016). Effect of long-term irrigation with treated wastewater of three soil types on their bulk densities, chemical properties and PAHs content in semi-arid climate. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1), 1-13.
7. Blum, W. (1993) 'Soil Protection Concept of the Council of Europe and Integrated Soil Research', in H. J. P. Eijsackers and T. Hamer (eds.), *Integrated Soil and*

Sediment Research: A basis for Proper Protection, Soil and Environment, Vol. 1. Dordrecht: Kluwer Academic

8. Bos R, Carr R, Keraita B (2010) Assessing and mitigating wastewater related health risks in low-income countries: An introduction. In: Drechsel P, Scott CA, Raschid-Sally L, Redwood M, Bahri A (Eds), Wastewater Irrigation and Health: Assessing and Mitigating Risks in Low-income Countries, Earthscan- International Development Research Centre (IDRC)-International Water Management Institute (IWMI), p. 29-47
9. Brindha K, Elango L (2014) Soil and groundwater quality with reference to nitrate in a semiarid agricultural region. Arab J Geosci 7:4683–4695. doi:10.1007/s12517-013-1100-5
10. Chaggu, E., Mashauri, D., Buuren, J.V., Sanders, W., Lettinga, G. (2002). Excreta Disposal in Dar-es-Salaam". *Environmental Management*, 30 (5): 609-620.
11. Ecopetrol. 2014. Informe técnico; Caracterización fisicoquímica, hidrobiológica y ecotoxicológica aguas residuales industriales estación de recolección apiay (era) y cuerpo de agua Receptor de su vertimiento (río ocoa). Submission 100156939.
12. FAO (2015). ¿Qué es el suelo?. Portal de suelos de la FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Disponible en web: <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/> Consultado Julio 25 de 2015.
13. Fatta-Kassinos D, Kalavrouziotis IK, Koukoulakis PH, Vasquez MI (2011) The risks associated with wastewater reuse and xenobiotics in the agroecological environment. Sci Total Environ 409:3555–3563
14. Goosen ID. 1971. Physiography and soils of the Llanos Orientales, Colombia. Publications of the International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC) – Enschede - The Netherlands, Series B, number 64.
15. Guedron S, Duwig C, Prado BL, Point D, Flores MG, Siebe C (2014) (Methyl) mercury, arsenic, and lead contamination of the world's largest wastewater irrigation system: the Mezquital Valley (Hidalgo State—Mexico). Water Air Soil Poll 225:2045
16. Gupta N, Khan DK, Santra SC (2010) Determination of public health hazard potential of wastewater reuse in crop production. World Rev Sci Technol Sustain Dev 7:328–340
17. Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC. 2004. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Meta. Bogotá.

18. Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. 1990. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá.
19. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2004. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Meta. Bogotá: IGAC
20. Jamiroy-Orozco, D., Menjivar-Flores, J., Rubiano-Sanabria, Y. 2015. Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Acta Agronómica* 64.4 : 302-307
21. Kabata A, Mukherjee A. Trace Elements From Soil to Human Ed. Springer. New York. 2007.
22. Kim, H. K., Jang, T. I., Kim, S. M., & Park, S. W. (2015). Impact of domestic wastewater irrigation on heavy metal contamination in soil and vegetables. *Environmental Earth Sciences*, 73(5), 2377-2383.
23. Klay, S., Charef, A., Ayed, L., Houman, B., & Rezgui, F. (2010). Effect of irrigation with treated wastewater on geochemical properties (saltiness, C, N and heavy metals) of isohumic soils (Zaouit Sousse perimeter, Oriental Tunisia). *Desalination*, 253(1), 180-187.
24. Koch, A., McBratney, A., Adams, M., Field, D., Hill, R., Crawford, J., ... & Zimmermann, M. (2013). Soil security: solving the global soil crisis. *Global Policy*, 4(4), 434-441.
25. Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. 2012. Landfill mining: a critical review of two decades of research. *Waste management*, 32(3), 513-520.
26. Mapanda F, Mangwayana EN, Nyamangara J, Giller KE (2005) The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare Zimbabwe. *Agr Ecosyst Environ* 107:151–165
27. McKeague, J. A., Fox, C. A., Stone, J. A. and Protz, R. 1987. Effects of cropping system on structure of Brookston clay loam in long-term experimental plots at Woodslee, Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 67: 571–584.
28. Micó C, Recatalá L, Peris M, Sánchez J. 2006. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere*, 65(5):863-872.
29. Pla, I. (2014). Advances in soil conservation research: challenges for the future. *SJSS. Spanish Journal Of Soil Science.* 4:3, 265-282

30. Pulido MV, Font R, Obregón-Cano S, Moreno-Rojas R, López MÁA, Anter J et al (2013) Cytotoxic and genotoxic effects of metal(oid)s bioactivated in rocket leaves (*Eruca vesicaria* subsp. *sativa* Miller). *Chemosphere* 93:2554–2561
31. Qadir M, Javier MS, Blanca J (2015) Environmental risks and cost-effective risk management in wastewater use systems. In: *Wastewater*. Springer, Netherlands, pp 55–72
32. Qadir, M., Mateo-Sagasta, J., Jiménez, B., Siebe, C., Siemens, J., & Hanjra, M. A. 2015. Environmental Risks and Cost-Effective Risk Management in Wastewater Use Systems. In *Wastewater* (pp. 55-72). Springer Netherlands.
33. Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P. G., Drechsel, P., Bahri, A., & Minhas, P. S. (2010). The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agricultural Water Management*, 97, 561-568.
34. Rahman, S. H., Khanam, D., Adyel, T. M., Islam, M. S., Ahsan, M. A., & Akbor, M. A. (2012). Assessment of heavy metal contamination of agricultural soil around Dhaka Export Processing Zone (DEPZ), Bangladesh: Implication of seasonal variation and indices. *Applied sciences*, 2(3), 584-601.
35. Rattan RK, Datta SP, Chhonkar PK, Suribabu K, Singh AK (2005) Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study. *Agric Ecosyst Environ* 109:310–322
36. Reed, S. C., Crites, R. W., & Middlebrooks, E. J. (1995). *Natural systems for waste management and treatment* (No. Ed. 2). McGraw-Hill, Inc..
37. Reynolds, W. D., Drury, C. F., Yang, X. M., Tan, C. S., & Yang, J. Y. (2014). Impacts of 48 years of consistent cropping, fertilization and land management on the physical quality of a clay loam soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 94(3), 403-419.
38. Rincón C., A. y Caicedo G., S. 2010. Monitoreo de las condiciones de los suelos establecidos con la asociación maíz/pastos para la recuperación praderas degradadas en el piedemonte llanero. En: Memorias. XV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. El suelo: soporte de la biodiversidad y la producción en los agroecosistemas tropicales. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional Eje Cafetero. (CD-ROM).
39. Simmons RW, Qadir M, Drechsel P (2010) Farm-based measures for reducing human and environmental health risks from chemical constituents in wastewater. In: Drechsel P, Scott CA, Raschid-Sally L, Redwood M, Bahri A (Eds), *Wastewater*

Irrigation and Health: Assessing and Mitigating Risks in Low-income Countries, Earthscan-International Development Research Centre (IDRC)-International Water Management Institute (IWMI), pp 209-238

40. Sinegani, A.A.S., Mahboobi, A.A. and Nazarizadeh, F., 2005. The effect of agricultural practices on the spatial variability of arbuscular mycorrhiza spores. *Turk. J. Biol.* 29, 149-153.
41. Soil Survey Division Staff. 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Handbook 18; 437.
42. Soil Survey Staff. 1951. Soil Survey Manual. USDA. Handbook 18 .U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C .
43. Sommer, M., 2006. Influence of soil pattern on matter transportation in and from terrestrial biogeosystems – a new concept for landscape pedology. *Geoderma*. 133(1-2), 107-123.
44. Trang, D.T., Van Der Hoek, W., Tuan, N.D., Cam, P.D., Viet, V.H., Luu, D.D., Konradsen, F., Dalsgaard, A., 2007. Skin disease among farmers using wastewater in rice cultivation in Nam Dinh, Vietnam. *Trop. Med. Int. Health* 12 (s2), 51–58.
45. UN Water. (2008). Tackling a global crisis: International Year of Sanitation 2008". Available at: http://esa.un.org/iys/docs/IYS_flagship_web_small.pdf (Accessed 15 April 2015).
46. Wang X, Zang S (2014) Distribution characteristics and ecological risk assessment of toxic heavy metals and metalloid in surface water of lakes in Daqing Heilongjiang Province, China. *Ecotoxicology* 23: 609–617
47. WHO, 2006. Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Grey Water. Volume 2. Wastewater Use in Agriculture. Geneva.
48. Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *International Scholarly Research Notices*, Article ID 402647, 20 pages, 2011. doi:10.5402/2011/402647
49. Yang S, Ou G, Liu J, Wang J, Lu G, Ji X (2014) Seasonal variations in physical properties of shallow soils on the slope of Mt. Gongga, China. *Arab J Geosci*. doi:10.1007/s12517-014-1292-3
50. Zapata, R. 2004. Química de la acidez del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Colombia

51. Niño, M., Navarro, M. (2015). Análisis de metales pesados en suelos irrigados con agua del río Guatiquía. Revista Ciencia en Desarrollo, Vol. 6 No. 2 ISSN 0121-7488 pp. 167-175