

Influencia del riego con aguas residuales domésticas tratadas sobre el contenido de patógenos en un suelo cultivado con caña de azúcar

Influence of irrigation with domestic wastewater treated on the pathogen content of a soil cultivated with sugarcane

COLCIENCIAS TIPO 1. ARTÍCULO ORIGINAL

RECIBIDO: AGOSTO 9, 2014; ACEPTADO: SEPTIEMBRE 29, 2014

Jorge Silva-Leal, PhD¹

jorge.silva04@usc.edu.co

Patricia Torres-Lozada, Ph.D²

patricia.torres@correounivalle.edu.co

Carlos Madera-Parra, Ph.D(c)²

carlos.a.madera@correounivalle.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Colombia (1)

Universidad del Valle, Cali-Colombia (2)

Resumen

Esta investigación evaluó el efecto de la irrigación con agua residual tratada, sobre el contenido de coliformes totales, E.coli y huevos de helmintos de un suelo cultivado con caña de azúcar. Se emplearon tres aguas de riego: agua de pozo, agua residual tratada por Tratamiento Primario Avanzado [TPA] y agua residual tratada por Tratamiento Primario Convencional [TPC] y se realizó seguimiento durante los doce meses de cultivo. Aunque los resultados mostraron que las aguas residuales evaluadas presentan restricción en su uso para riego agrícola, por los valores altos de coliformes totales, E. Coli y huevos de helmintos, las variables microbiológicas evaluadas al suelo mostraron que la concentración de E. Coli disminuyó desde el día de la siembra hasta el día de la cosecha y el análisis estadístico de las variables microbiológicas mostró que no existen diferencias estadísticas significativas entre los valores medios de los tratamientos.

Palabras Clave

Aguas residuales; caña de azúcar; coliformes totales; E. coli; huevos de helmintos; suelo agrícola.

Abstract

This research evaluated the effect of irrigation with wastewater in the content of total coliform, E. Coli and helminths eggs of a soil cultivated with sugarcane. We used three irrigation water (groundwater, wastewater treated by chemically enhanced primary treatment CEPT and wastewater treated by conventional primary treatment- CPT) and we did monitor during the twelve months of culture. Although, the results showed that the wastewater evaluated presented restriction for use in agricultural irrigation due to the high values of total coliforms, E. coli, and Helminths Eggs, the results of microbiological soil variables evaluated, showed that the concentration of E. coli decreased from the day of planting to the day of harvest and the statistical analysis of microbiological variables showed no significant difference between the mean values of each treatment.

Keywords

Total coliform; E. Coli; agricultural soil; sugarcane; wastewater.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las prácticas más comunes de disposición final de las aguas residuales domésticas ha sido el vertimiento directo sin tratamiento en los cuerpos de agua superficiales y en el suelo; sin embargo, la calidad de estas aguas puede generar dos tipos de problemas: el primero, de salud pública, particularmente importante en países tropicales por la alta incidencia de enfermedades infecciosas cuyos agentes patógenos son dispersados en el ambiente de manera eficiente por las excretas o las aguas residuales crudas (Mara, 1996); el segundo, ambientales, por afectar la conservación o protección de los ecosistemas acuáticos y del suelo, lo que contribuye a la pérdida de valor económico del recurso y del medio ambiente, y genera, a su vez, una disminución del bienestar para la comunidad ubicada aguas abajo de las descargas (Pierce & Turner, 1990).

En el año 2000, las Naciones Unidas publicaron las metas de desarrollo del milenio. El objetivo uno de dichas metas busca eliminar la extrema pobreza y el hambre, y en el objetivo siete se busca garantizar la sostenibilidad del medio ambiente; el uso de las aguas residuales podría contribuir al desarrollo de dichas objetivos y a producir más alimentos, aumentando la producción de las cosechas (WHO, 2006). Sin embargo, se hace necesaria la evaluación del uso de aguas residuales y su posible contaminación del suelo y los cultivos con microorganismos patógenos.

Aunque el uso de las aguas residuales puede ayudar a las comunidades, generando una mayor producción de alimentos, este uso debe realizarse pensando principalmente en la protección de la salud pública y el ambiente, teniendo en cuenta que en muchas partes del mundo el uso indiscriminado de aguas residuales en el riego de cultivos para consumo humano está relacionado con las altas tasas de morbilidad por gastroenteritis, disentería y helmintiasis, debido a la presencia de bacterias, virus y parásitos (Sáenz, 1991).

Actualmente son muchos los países, tanto industrializados como en desarrollo, que utilizan las aguas residuales domésticas para regar suelos agrícolas (Madera, 2003). India es el segundo país con mayor población en el mundo con más de mil millones de habitantes, lo que ha llevado a una rápida reducción de su reserva de aguas subterráneas, lo que unido a la alta contaminación del agua, ha provocado la búsqueda de nuevas fuentes alternativas para el suministro (EPA, 2004), dentro de las cuales el uso

de aguas residuales para riego agrícola se muestra como la más importante.

En el mundo se estima que al menos veinte millones de hectáreas en cincuenta países son irrigadas con aguas residuales crudas o parcialmente diluidas, lo que corresponde al 10% del total de hectáreas irrigadas. Cerca de 525.000 hectáreas son irrigadas con aguas residuales recicladas y, a pesar de los esfuerzos y progresos para el control de la contaminación del agua, el riego con agua residual sin tratamiento continúa prevaleciendo (Jiménez & Asano, 2008; Lazarova & Bahri, 2008; Bahri, 2009).

La utilización de aguas residuales para riego agrícola es el principal uso para este tipo de aguas; en al menos 43 países (21 millones m³/d) son empleadas para riego de diferentes cultivos como cebada, maíz, avena, algodón, flores, brócoli, tomate, etc. (Jiménez & Asano, 2008).

En América Latina se estima que más de 510.000 hectáreas son regadas directamente con aguas residuales y 2.500.000 hectáreas son regadas con aguas contaminadas (Jiménez & Asano, 2008). Colombia tiene una superficie irrigada con aguas residuales de 1.230.193 hectáreas, de las cuales el 27% corresponde a agua residual tratada y el 73% restante a agua residual sin tratar, generalmente diluida con aguas superficiales (Moscoso & Egocheaga, 2004).

Adicionalmente, teniendo en cuenta que en Colombia se presenta un gran déficit de saneamiento básico –solo el 8% de las aguas residuales son tratadas– se presenta un gran riesgo de exposición directa e indirecta debido al gran volumen de aguas residuales que son descargadas a los cuerpos de agua superficial, los cuales reciben una alta carga contaminante de materia orgánica, nutrientes y patógenos (Balcázar, 2007). Por lo tanto, esta investigación evaluó el efecto del riego con aguas residuales tratadas, sobre el contenido de coliformes totales, E.Coli y huevos de helminos, de un suelo cultivado con caña de azúcar.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La PTAR-C funciona como una planta de tratamiento de aguas residuales que puede operar bajo las modalidades de Tratamiento Primario Convencional [TPC] o Tratamiento Primario Avanzado [TPA].

El TPA se realiza mediante la aplicación de un coagulante –con o sin ayudante de floculación– con el objetivo de aumentar las eficiencias en remoción de SST y DBO₅.

Se emplearon tres calidades de agua de riego: agua de pozo, agua residual tratada por TPA, y agua residual tratada por TPC. Teniendo en cuenta que en el Valle del río Cauca se cuenta con un total de 1980 pozos, de los cuales se emplean 1337 para uso agrícola (Torres, Cruz & Villegas, 2003), se empleó como testigo el agua de pozo.

Como variables de control, en las tres calidades de agua de riego se midieron variables microbiológicas (i.e., coliformes totales y E. Coli) y parasitológicas (i.e., huevos de helmintos) durante los 10 meses de riego del cultivo de caña de azúcar.

Con los resultados obtenidos de los análisis de calidad de agua, se realizaron comparaciones e inferencias estadísticas entre los valores medios para todas las variables analizadas. Se utilizaron las siguientes pruebas:

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar si los datos presentaban una distribución normal (Montgomery & Runger, 2003).

Hipótesis nula H_0 : La distribución de la variable X es NORMAL

Hipótesis alterna H_a : La distribución de la variable X no es NORMAL

Definida la normalidad, se empleó la prueba de Bartlett, para demostrar la homogeneidad de varianzas (Montgomery & Runger, 2003).

Hipótesis nula H_0 : Existe homogeneidad de varianzas

Hipótesis alterna H_a : No existe homogeneidad de varianzas

A los datos que no cumplieron el supuesto de normalidad, se les aplicó la prueba de Kruskal Wallis (Montgomery & Runger, 2003).

Con los datos que cumplieron el supuesto de normalidad y de homogeneidad, se empleó el análisis de varianzas (ANOVA), para contrastar si existía alguna diferencia entre las medias de los grupos (Montgomery & Runger, 2003).

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alterna $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$

5. Cuando la ANOVA mostró que existían diferencias entre los tratamientos, se aplicó la prueba post-

anova (comparación múltiple de Tukey), que permite examinar, en forma simultánea, comparaciones entre todos los pares de grupos (Montgomery & Runger, 2003).

El suelo usado para la siembra fue definido como un suelo con características vérticas el cual, según Cenicña (2006) representa el 63.8% de los suelos en los que se realiza el cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca. Para la siembra se emplearon semillas vegetativas de la variedad CC 8592 con 60 cm de longitud, por ser la más empleada en el Valle del Cauca (Cenicña, 2008).

El número de tratamientos evaluados fue tres, los cuales se describen en la Tabla 1. El diseño experimental empleado fue de Bloques al azar, empleando tres bloques y tres réplicas por tratamiento.

Tabla 1. Tratamientos evaluados

Tratamiento / Agua de riego	
1	Agua de pozo
2	Agua residual tratada por Tratamiento Primario Avanzado-TPA
3	Agua residual tratada por Tratamiento Primario Convencional-TPC

Para el riego del cultivo se realizó una caracterización inicial a los sustratos de cultivos, incluyendo la capacidad de campo, la retención de humedad y el punto de marchitez permanente, con el objetivo de poder definir la lámina de agua rápidamente aprovechable [LARA].

Con los datos de la estación meteorológica de la PTAR-C, se calculó la evapotranspiración del cultivo –para dos etapas del crecimiento del cultivo: macollamiento y rápido crecimiento–, a través de la ecuación Penman-Monteith (FAO, 2006), la cual utiliza los datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. Con los datos de la LARA y la evapotranspiración del cultivo, se calculó la frecuencia de riego y se definieron los días de riego. Con el objetivo de evaluar la influencia de la calidad de las aguas en los sustratos de cultivos, se realizaron análisis de la calidad microbiológica (coliformes totales y E. Coli) y parasitológica (huevos de helmintos) de los suelos. Con los resultados se realizó el análisis estadístico de los datos de los coliformes totales y E. coli conforme al diseño experimental empleado de bloques al azar.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Según los cálculos, la frecuencia de riego fue de 15 días para el suelo empleado. La Tabla 2 muestra los volúmenes de agua aplicados a cada tratamiento por mes.

Tabla 2. Volumen de agua aplicado /mes a cada tratamiento

Mes	Et (mm/día)	Precipitación (mm)	Volumen (litros)
Febrero		46.6	120
Marzo	3	152	48
Abril	3	109.2	48
Mayo	3	92.4	48
Junio	3	103.6	64
Julio	4.5	39.2	64
Agosto	4.5	8.6	80
Septiembre	4.5	54.4	64
Octubre	4.5	90.6	64
Noviembre	4.5	150.4	80
Diciembre		99.2	32
Total		946.2	712

En esta Tabla 2 se observa que durante la germinación en el primer mes, se aplicó mayor cantidad de agua para garantizar una humedad que permitiera un buen desarrollo.

Se observa que el volumen de agua aplicado fue de 712 litros/0.5m² para cada tratamiento, lo que corresponde a 1424 mm de agua de riego aplicados. Teniendo en cuenta que el consumo oscila entre 1200 y 1500 mm por año (Torres, Cruz & Villegas, 2004) y estudios realizados en Australia reportan que el cultivo de caña tiene un requerimiento óptimo de agua de 1530 mm/año, se considera que el volumen de agua aplicado fue el adecuado.

Adicionalmente, los valores de precipitación (946 mm) se encontraron dentro del rango normal para los suelos del Valle, ya que ésta oscila entre 800 y 2600mm dependiendo de la ubicación (Torres et al., 2003).

La Tabla 3 muestra los resultados de las caracterizaciones realizadas al agua de pozo empleada para el riego. En ella se observan valores de coliformes fecales altos y una presencia de huevos de helmintos, lo que indica una posible contaminación de esta fuente de agua. Sin embargo, esta condición no limita su posible utilización para riego agrícola.

Tabla 3. Resultados de las caracterizaciones del agua de pozo (n=11)

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Coliformes totales (UFC/100ml)*	4.59×10^4	0	3.8×10^5	1.25×10^5
E.Coli (UFC/100ml)*	1.44×10^3	0	1×10^4	3.28×10^3
Huevos de Helmintos (HH/l)*	<1	0	1	-

* Media geométrica.

La Tabla 4 presenta los resultados de las caracterizaciones realizadas al agua TPA. Muestra que el efluente TPA de la PTAR-C es catalogado como un agua residual de mediana carga, según lo definido por Tchoglanobous, Burton, y Stencil (2003), por el contenido de coliformes totales, E. coli y huevos de helmintos. Adicionalmente, se observa que el efluente de la PTAR-C presenta una concentración alta de microorganismos patógenos, mostrando que la tecnología de tratamiento no alcanza buenas remociones, lo que es normal para un nivel de tratamiento primario de aguas residuales. Sin embargo, de acuerdo con Tsukamoto, (2002), este tipo de tecnologías puede ofrecer una alta posibilidad de remoción de patógenos.

Tabla 4. Resultados de las caracterizaciones de la calidad del agua residual tratada por TPA (n=11)

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Coliformes totales (UFC/100ml)*	2.12×10^7	4.9×10^6	1.79×10^8	5.74×10^7
E.Coli (UFC/100ml)*	4.98×10^6	1×10^6	4.5×10^7	1.38×10^7
Huevos de Helmintos (HH/l)*	15	0	80	27

* Media geométrica.

La Tabla 5 presenta los resultados de las caracterizaciones del agua TPC. Al igual que con los resultados del agua TPA, los datos muestran que el efluente TPC de la PTAR-C es catalogado como un agua residual de mediana carga, según lo definido por Tchoglanobous et al., (2003), por su contenido de coliformes totales, E. coli y huevos de helmintos; los valores de patógenos se encuentran dentro del rango normal de aguas residuales domésticas.

Tabla 5. Resultados de las caracterizaciones de la calidad del agua residual tratada por TPC (n=1)

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Coliformes totales (UFC/100ml)*	1.61×10^7	2×10^6	4.0×10^7	1.03×10^7
E.Coli (UFC/100ml)*	3.64×10^6	6×10^5	1.16×10^7	3.95×10^6
Huevos de Helmintos (HH/l)*	12	0	45	19

* Media geométrica.

En general, las variables microbiológicas y parasitológicas de las aguas residuales tratadas presentan restricción de uso para riego por los valores altos de coliformes totales (2.12×10^7 TPA y 1.6×10^7 TPC), E.

Coli (4.98×10^6 TPA y 3.64×10^6) y huevos de helmintos (15 TPA y 12 TPC) según las directrices de calidad de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006). Por lo tanto, para el uso de este tipo de aguas residuales, es necesario identificar los diversos patógenos presentes para definir los periodos de sobrevivencia en el suelo y en los cultivos y establecer medidas de protección y control del campo de cultivo y de los agricultores, como uso de ropa gruesa, botas y guantes, entre otros, así como también ciclos de riego y tiempo de cosecha después del último riego.

La Tabla 6 muestra los resultados del análisis estadístico de las pruebas realizadas; se observa que todas las aguas empleadas en el riego presentaron normalidad en la distribución y homogeneidad en la varianza, lo que permitió la realización del análisis de varianza a las variables en las cuales se validaron los supuestos.

Tabla 6. Valor de p de la prueba de normalidad y homogeneidad

Variable	Kolmogorov Smirnov	Bartlett
Coliformes Totales	0.827	0.090
E. coli	0.505	0.886
Huevos de Helminto	0.913	0.900

Los resultados del análisis de varianza [Anova] que presenta la Tabla 7, indican que se rechazó la hipótesis nula, mostrando que existe diferencia entre las tres calidades de agua –de pozo y tratadas por TPA y TPC–, por lo cual fue necesario realizar la prueba postanova (Tukey) para definir en cuál de las aguas de riego se presenta diferencia o igualdad.

Tabla 7. Resultados del ANOVA

Variable	Valor p	Anova
Coliformes Totales	0.001	Rechaza H_0
E. coli	0.001	Rechaza H_0
Huevos de Helminto	0.011	Rechaza H_0

La prueba postanova mostró que no existen diferencias significativas entre los valores medios presentados para el contenido de coliformes totales, E. coli y huevos de helmintos en las dos calidades de agua residual tratada. Con relación al agua de pozo, se observó una diferencia significativa para las variables evaluadas, evidenciando el alto contenido de estos patógenos en las aguas residuales.

La Tabla 8 muestra los resultados de la caracterización inicial del suelo antes de la siembra del cultivo; las variables

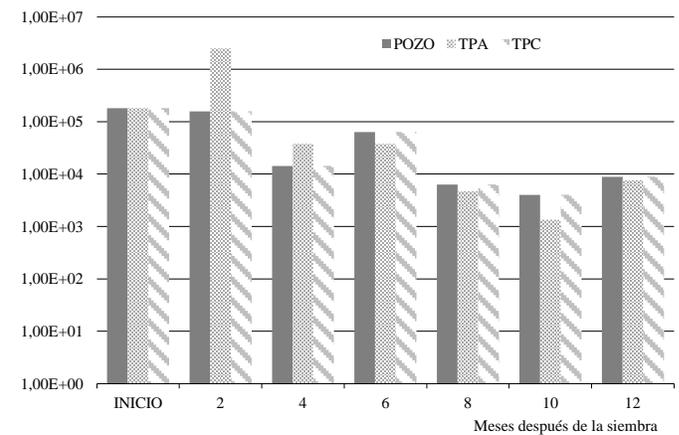
microbiológicas fueron altas, indicando que éste presentaba una alta contaminación antes de la siembra y un posible riesgo para las personas que están en contacto con este suelo; sin embargo, estas características no restringen su uso para la siembra de caña de azúcar, ya que es un cultivo que tiene un procesamiento antes de su consumo.

Tabla 8. Características iniciales del suelo

Variable	Valor
Coliformes totales (UFC/g)	3.9×10^6
E. Coli (UFC/g)	1.80×10^5
Huevos de Helmintos (HH/g)	<1

Después de la siembra en los tratamientos, se realizó el seguimiento de la calidad microbiológica de los sustratos, con el objetivo de evaluar la influencia de la calidad microbiológica del agua de riego en los mismos. La Figura 1 muestra la variación de E. Coli en el suelo; sin embargo, se debe destacar que la concentración de coliformes totales puede estar asociada a contaminación por el medio ambiente como la presencia de materia fecal.

Figura 1. Variación de E. coli en el suelo para las tres calidades de agua



En la Figura se observa que la concentración de E. Coli disminuyó hasta el mes 10, momento en que se suspendió el riego. Sin embargo en el mes de 12 momento de la cosecha, la concentración de E. Coli tuvo un ligero aumento, debido probablemente a la formación de un microclima que permitió una repoblación de las bacterias, ya que la radiación solar no ejercía ningún efecto directo sobre el suelo debido a que la masa foliar de las plantas disminuía el paso de la luz solar a la superficie del suelo.

Con relación al contenido inicial, se observa una reducción de 1 unidad logarítmica de E. Coli. Esta condición presenta un riesgo potencial bajo para las personas que están en contacto con el cultivo y el suelo

acorde con lo reportado por Shuval (1990).

La Tabla 9 muestra un resumen de las variables microbiológicas al final del cultivo para los tratamientos.

Tabla 9. Resultados de las variables microbiológicas

Agua	Coliformes Totales (UFC/g)	E. Coli (UFC/g)	Huevos de Helmintos (#/g)
Pozo	2.31×10^6	8.89×10^3	<1
TPA	4.15×10^6	7.56×10^3	<1
TPC	5.94×10^6	5.01×10^3	<1

Aunque la presencia de coliformes totales y E. Coli al finalizar el cultivo representa un riesgo bajo para los agricultores, se hace necesaria la implementación de medidas de protección, principalmente en los momentos en que se está en contacto con el cultivo, como los riegos y la cosecha. Sin embargo, los resultados no mostraron la presencia de huevos de helmintos en ningún tratamiento, debido probablemente a que se presentó una profundización de los huevos, por lo que al realizar la toma de muestra superficial para el análisis no se identificó ninguno de estos patógenos.

El análisis de varianza para el contenido de coliformes totales –CT y de E. coli en el suelo al final del cultivo, mostró que no existe diferencia significativa entre los valores medios de los tratamientos (CT: $g/2$, $F=0.175$, $p=0.8116$) (E. coli: $g/2$, $F=0.0053$, $p=0.5229$), lo que evidencia que el uso de cualquiera de las aguas de riego evaluadas en esta experimentación no representa una diferencia significativa en el comportamiento de estas variables.

IV. CONCLUSIONES

Las aguas residuales tratadas empleadas en esta investigación presentan restricciones para su uso en riego agrícola, por los valores altos de coliformes totales (2.12×10^7 TPA y 1.6×10^7 TPC), E. Coli (4.98×10^6 TPA y 3.64×10^6) y huevos de helmintos (15 TPA y 12 TPC), de acuerdo con las directrices de calidad de la Organización Mundial de la Salud. Sin embargo, los resultados de las variables microbiológicas del suelo mostraron que la concentración de E. Coli disminuyó desde el día de la siembra hasta el día de la cosecha y el análisis estadístico de las variables microbiológicas mostró que no existe diferencia significativa entre los valores medios de los tratamientos, lo que evidencia que el usar aguas residuales tratadas por TPA o TPC o agua de pozo para riego en caña no representa una diferencia significativa en el

comportamiento de los coliformes totales y E. Coli en el suelo. Sin embargo, para el uso de este tipo de aguas residuales en el cultivo de caña de azúcar, es necesario establecer medidas de protección y control en el campo de cultivo y del agricultor, como uso de ropa gruesa, botas y guantes, y el tiempo de cosecha, entre otros.

V. REFERENCIAS

- Bahri, A. (2009). *Managing the other side of the water cycle: making wastewater an asset* [TEC Background Paper No. 13]. Mölnlycke, Suecia: Global Water Partnership. Disponible en [http://www.gwp.org/Global/ToolBox/References/Managing%20the%20other%20side%20of%20water%20cycle.%20Making%20wastewater%20an%20asset%20\(GWP,%202009\).pdf](http://www.gwp.org/Global/ToolBox/References/Managing%20the%20other%20side%20of%20water%20cycle.%20Making%20wastewater%20an%20asset%20(GWP,%202009).pdf)
- Centro de Investigación de la Caña [CENICAÑA]. (2008). *Informe anual 2007*. Cali, Colombia: Cenicaña.
- Centro de Investigación de la Caña.- [CENICAÑA]. (2006). Producción de caña de azúcar en el valle del río Cauca. *Carta trimestral*, 28(1), 16-37.
- Allen, Pereira, Raes & Smith. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: FAO. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/x0490s/x0490s.pdf>
- Jiménez, B. & Asano. T. (2008). Water reclamation and reuse around the world. En B. Jiménez & T. Asano (Eds.), *Water reuse: An international survey of current practice, issues and needs*, (Cap.1). Londres, UK: IWA.
- Lazarova, V. & Bahri, A. (2005). *Water reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grass*. Boca Raton, FL: CRC.
- Madera, C. (2003). *Microbiological and agronomic effluent quality from duckweed and stabilization ponds*. Ginebra, Colombia [Tesis]. Institute for water education the Netherlands: Delft.
- Tchoglanobous, G., Burton, F., & Stencel, D. [Metcalf & Eddy Inc]. (2003). *Waste engineering: treatment, and reuse* [4a ed.]. New York, NY: McGraw-Hill.
- Montgomery, D.C. & Runger, G. C. (2003). *Applied statistics and probability for engineers* [3a ed.]. New York, NY: Wiley.
- Moscoso, J. & Egocheaga L.Y. (2004). Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: realidad y potencial [en línea]. Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaidis/mexico26/ii-080.pdf>
- Pierce D. & Turner K. (1990). *Economics resources and the environment*. Washington D.C.: Jhon Hopkins.
- Sáenz, F. R. (1991). *Introducción y uso de aguas residuales tratadas en agricultura y acuicultura. Riego y salud* [en línea]. Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind53/rys/rys.html>
- Shuval, H. I. (1990). *Wastewater irrigation in developing countries: health effects and technical solutions* [Water and Sanitation Discussion Paper Series UNDP World Bank, No. 2]. Washington, D.C.: PNUD/BM.

- Torres, J., Cruz, R., & Villegas, F. (2003). Manejo del riego en la caña de azúcar. En *Memorias del XV congreso ATACORI*, (pp.71-81). San José, Costa Rica.
- Torres, J., Cruz, R., & Villegas, F. (2004). *Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar* [2a ed.]. Cali, Colombia: Cenicaña.
- Tsakamoto, R.Y. (2002). Tratamiento primario avanzado: el paradigma moderno del tratamiento de aguas residuales sanitarias, 1ª Parte. *Revista Agua Latinoamérica*, 2(2). [en línea]. Recuperado de <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/3-4-02basico.pdf>
- U.S. Environmental Protection Agency [EPA]. (2004, sept.). *Guidelines for Water Reuse* [EPA/625/R-04/108]. Washington, D.C.: EPA.
- World Health Organization [WHO] (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater. Volume 2. Wastewater use in agriculture*. Ginebra, Suiza: WHO.
- C. Balcázar [Ed.]. (2007). *Saneamiento para el desarrollo. Como estamos en 21 países de América Latina y el Caribe* [Conferencia Latinoamericana de saneamiento. Cali, Colombia]. Lima, Perú: WSP, BM, Cosude, Unicef, BID. Disponible en http://www.wsp.org/sites/wsp.org/files/publications/11282007125731_Latinosan_Final.pdf

VI. CURRÍCULOS

Jorge Silva-Leal. Ingeniero de Producción Biotecnológica, Especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Magister en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Docente del Programa de Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Santiago de Cali (Colombia).

Patricia Torres-Lozada. Ingeniera Sanitaria. Magister en Ingeniería Civil: Hidráulica y Saneamiento, Doctora en Ingeniería Civil: Hidráulica y Saneamiento. Profesora Titular del Programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle (Cali, Colombia). Líder del grupo de investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental.

Carlos Arturo Madera-Parra. Ingeniero sanitario, Magister en Ingeniería Sanitaria, Candidato a Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Profesor asociado del Programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle (Cali, Colombia).