

Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión

Domestic wastewater reuse in agriculture. A review

Jorge Silva¹, Patricia Torres² y Carlos Madera³

RESUMEN

Las aguas residuales son una importante fuente adicional para satisfacer la demanda del recurso, a causa de la disponibilidad limitada de agua potable para cubrir los requerimientos de las poblaciones, los bajos costos, los beneficios para los suelos agrícolas y la disminución del impacto sobre el ambiente. Sin embargo, el predominio del uso de aguas residuales crudas o diluidas con aguas superficiales y el bajo porcentaje de aguas residuales tratadas en Colombia y en los países de América Latina, en general, generan riesgos en la salud pública, en especial cuando se utilizan para riego de cultivos para consumo directo. Para el reuso de aguas residuales se aconseja realizar siempre un tratamiento preliminar y primario; el tratamiento secundario, además de remover de manera eficiente materia orgánica y sólidos suspendidos, influye directamente sobre la estructura de algunos compuestos, como los de nitrógeno, siendo importante tener en cuenta los requerimientos del cultivo a irrigar y el tipo de suelo. Este artículo propone el uso de aguas residuales domésticas como un recurso alternativo, siempre que se traten y manejen apropiadamente para hacerlo de manera segura en actividades agrícolas, privilegiando el riego de cultivos que sufrirán una transformación industrial posterior.

Palabras clave: agua residual cruda, agua residual diluida, agua residual tratada, aprovechamiento agrícola, nutrientes, riesgo microbiológico.

ABSTRACT

Because of the limited availability of water to satisfy the population requirement, the low costs, soil benefits and decrease of the environmental impact, the wastewaters are an important additional source to guarantee the water demand. However, the predominant use of raw wastewater diluted with superficial waters and low percent of wastewater treatment in Colombia and Latin American countries generate public health risks mainly when the reuse is for irrigation of crops of direct consumption. It is always recommended to make a preliminary and primary treatment; the secondary treatment besides removing efficiently organic matter and suspended solids, influences directly in the compounds such as nitrogen, thus it is important to keep in mind the requirements of the cultivation type and the soil. This article proposes the use of domestic wastewaters as an alternative resource in agricultural activities and privileging the industrialized crops.

Key words: raw wastewater, diluted wastewater, treated wastewater, nutrients, microbiologic risk.

Introducción

El agua es un recurso indispensable para las actividades humanas, para el desarrollo económico y el bienestar social. En promedio se necesitan 3.000 L de agua por persona para generar los productos necesarios para la alimentación diaria. Aunque la irrigación para fines agrícolas representa apenas 10% del agua usada, ésta es la actividad de mayor consumo de agua dulce del planeta (Fao y Fida, 2006).

El crecimiento acelerado de la población, especialmente en países en vía de desarrollo; la contaminación de los cuerpos de agua superficial y subterránea; la distribución

desigual del recurso hídrico y los graves períodos secos; han forzado a buscar nuevas fuentes de abastecimiento de agua, considerándose a las aguas residuales una fuente adicional para satisfacer la demanda del recurso.

Una de las prácticas más comunes de disposición final de las aguas residuales domésticas ha sido la disposición directa 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: de salud pública, particularmente importantes en países tropicales por la alta incidencia de enfermedades infecciosas, cuyos agentes patógenos se dispersan en el ambiente de manera eficiente a través de

Fecha de recepción: septiembre 6 de 2006. Aceptado para publicación: julio 10 de 2008

¹ Programa de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali (Colombia). joasilva@univalle.edu.co

² Profesora asociada, EIDENAR, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali (Colombia). patolo@univalle.edu.co

³ Profesor asistente, EIDENAR, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali (Colombia). cmadera@univalle.edu.co

las excretas o las aguas residuales crudas (Mara, 1996), y los problemas 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 y Turner, 1990).

La utilización de aguas residuales en áreas agrícolas proviene de los tiempos antiguos en Atenas; sin embargo, la mayor proliferación de sistemas de aplicación de aguas residuales en el suelo ocurrió durante la segunda mitad del siglo XIX, principalmente en países como Alemania, Australia, Estados Unidos, Francia, India, Inglaterra, México y Polonia. En el periodo de la posguerra, la creciente necesidad de optimización de los recursos hídricos renovó el interés por esta práctica en países como África del Sur, Alemania, Arabia Saudita, Argentina, Australia, Chile, China, Estados Unidos, India, Israel, Kuwait, México, Perú, Sudán y Túnez (Parreiras, 2005).

Con frecuencia se desconoce la forma como los alimentos se han producido; sin embargo, aguas residuales, a menudo no tratadas, son utilizadas para el riego de 10% de los cultivos del mundo. Aunque ésta es una práctica en gran parte oculta y sancionada en un gran número de países, muchos agricultores, especialmente aquéllos ubicados en las áreas urbanas, utilizan las aguas residuales porque, además de los beneficios de su uso, no tienen ningún costo y son abundantes, aún durante la época de sequías (Scott *et al.*, 2004).

En países del Sudeste Asiático, de América Latina y de África, el riego con aguas residuales se hizo durante décadas de manera espontánea y no planificada por parte de los agricultores más pobres de las áreas urbanas y periurbanas (Mara y Carnicross, 1990; Bakker *et al.*, 2000). En Israel, 67% del agua residual es usada para riego; en India, 25% y en Sudáfrica, 24%. En América Latina, alrededor de 400 m³·s⁻¹ de agua residual cruda es entregada a fuentes superficiales y las áreas son irrigadas, la mayoría de las veces, con aguas residuales no tratadas; más de la mitad de esta cantidad se genera en México (Post, 2006).

Colombia tiene una superficie irrigada con aguas residuales de 1.230.193 ha, con 27% de agua residual tratada y 73% sin tratar, por lo general diluida con aguas superficiales; al igual que sucede en toda América Latina, no se cuenta con información completa y confiable sobre el tema del reuso (Cepis, 2003) y solamente 8% del total de aguas residuales que se producen diariamente es tratado (WSP *et al.*, 2007).

En este artículo se hace un análisis del aprovechamiento o reuso agrícola de las aguas residuales domésticas crudas, diluidas o tratadas y de las implicaciones de los diferentes niveles de tratamiento, y se presentan algunas experiencias en Colombia y en otros países.

Generalidades del reuso

El reuso de aguas residuales está definido como su aprovechamiento en actividades diferentes a las cuales fueron originadas (Ministerio del Medio Ambiente, 2001). Los tipos y aplicaciones se clasifican de acuerdo con el sector o infraestructura que recibe el beneficio, siendo los principales: el urbano, que incluye irrigación de parques públicos, campos de atletismo, áreas residenciales y campos de golf; el industrial, en el que ha sido muy empleado durante los últimos años, especialmente en los sistemas de refrigeración de las industrias, y el agrícola, en la irrigación de cultivos. Este último es el principal uso (Gutiérrez, 2003).

La actividad agrícola demanda agua residual por la necesidad de un abastecimiento regular que compense la escasez del recurso, por causa de la estacionalidad o la distribución irregular de la oferta de otras fuentes de agua a lo largo del año (Lara y Hernández, 2003); adicionalmente, el uso de aguas residuales presenta beneficios asociados al mejoramiento de la fertilidad de los suelos agrícolas por el aporte de materia orgánica, macronutrientes (N y P) y oligoelementos, como Na y K, permitiendo reducir, y en algunos casos eliminar, la necesidad del uso de fertilizantes químicos y trayendo beneficios económicos al sector (Hoek *et al.*, 2002, citados por Medeiros *et al.*, 2005). La preservación del medio ambiente se favorece también, al evitar el vertimiento directo de las aguas residuales o al reducir los costos de su tratamiento, conservando la calidad del agua y la recarga de los acuíferos de aguas subterráneas (Moscoso, 1993; Cepis, 2004).

El marco normativo y los criterios de calidad

La agricultura requiere mayor cantidad de agua que otros usos, como el doméstico o el industrial; sin embargo, para el uso de aguas residuales debe considerarse aspectos de calidad con el fin de evitar riesgos a la salud pública, principalmente en lo que se refiere a sus características microbiológicas. Ésta es considerada la principal razón para el establecimiento de guías y regulaciones para el reuso seguro de estas aguas en diferentes aplicaciones (Metcalf y Eddy, 2003).

Las principales guías que regulan el reuso son las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS), sobre calidad microbiológica de aguas residuales para irrigación (tabla 1),

clasificadas en tres categorías, según sus niveles de parásitos y coliformes fecales, indicadores de la presencia de patógenos (virus, bacterias, protozoos y helmintos) en las aguas residuales domésticas (OMS, 1989), y las físico-químicas para calidad de las aguas de riego de la FAO (1999).

En 2006, la OMS publicó nuevas guías de uso de aguas residuales, excretas y aguas grises (WHO, 2006), que son una herramienta de manejo preventivo de aguas residuales en agricultura para maximizar la seguridad para la salud pública. La guía incluye el análisis microbiano, esencial para el análisis del riesgo, que comprende la recolección de información relativa a patógenos presentes en aguas residuales, campos y cosechas regados. Estos factores varían según la región, clima, estación, etc. y deben ser medidos siempre que sea posible, sobre un sitio específico. La guía no da valores sugeridos para patógenos virales, bacteriales o protozoarios, únicamente valores para huevos de helmintos ($\leq 1/L$) tanto para riego con como sin restricción; para el riego por goteo en cultivos de alto crecimiento, no da recomendación alguna. A través de un análisis cuantitativo del riesgo microbiano se puede lograr la remoción de patógenos requerida para no superar el riesgo aceptable

por infección. Adicionalmente, se incluyen las medidas de control para la protección de la salud (tabla 2).

La FAO publicó en 1999 la guía sugerida para aguas tratadas en el reuso agrícola y sus requerimientos de tratamiento (tabla 3).

La Agencia estadounidense de Protección Ambiental (EPA) clasificó el reuso en ocho categorías, de acuerdo con la calidad del agua: urbano, áreas de acceso restringido, agrícola para cultivos consumidos crudos y para cultivos no consumidos crudos, recreacional, industrial, recarga de acuíferos y reuso indirecto potable (EPA, 2004; Metcalf y Eddy, 2003). Adicionalmente, figuran las directrices físico-químicas de la FAO para interpretar la calidad de las aguas de riego. En ellas se clasifica el grado de restricción de uso en tres niveles, de acuerdo con el problema potencial definido por características físico-químicas del agua, como la conductividad y el RAS (relación adsorción/sodio) (tabla 4).

En general, los países que tienen una normatividad sobre el reuso de las aguas residuales han tomado como referencia lo establecido por la EPA, en términos de la clasificación por tipos del reuso, y las directrices de la OMS y de la FAO en lo relacionado con límites máximos permisibles de algunas

TABLA 1. Directrices de la OMS (1989) sobre calidad parasitológica y microbiológica de aguas residuales para uso en agricultura^a.

Categoría	Condiciones de reutilización	Grupo expuesto ^b	Nematodos intestinales	Coliformes fecales
			(promedio aritmético de huevos/L) ^c	(promedio geométrico/100 mL)
A	Irrigación de cultivos probablemente consumidos crudos. Campos deportivos, parques públicos.	Agricultores, consumidores, público	$\leq 0,1^d$	$\leq 10^3$
B	Irrigación de cereales. Cultivos industriales, forrajes, pastos y árboles ^e .	Agricultores, pero no niños <15 años, y comunidades cercanas	≤ 1 Riego por aspersión	$\leq 10^5$
		Agricultores, pero no niños <15 años y comunidades cercanas	≤ 1 Riego por surco	$\leq 10^3$
		Agricultores, incluyendo niños <15 años, y comunidades cercanas	$\leq 0,1$ Cualquier tipo de riego	$\leq 10^3$
C	Irrigación localizada de cultivos en la categoría B, si no están expuestos los trabajadores y el público.	Ninguno	No aplicable	No aplicable

Fuente: Adaptado de Blumenthal *et al.*, 2000

^a En casos específicos, los factores locales epidemiológicos, socioculturales y ambientales deben ser tomados en cuenta, y las directrices modificadas conformemente. ^b Áscaris, trichuros y anquilostomas. ^c Durante el período de riego. ^d Una directriz más rigurosa (≤ 200 coliformes fecales por 100 mL) es apropiada para céspedes públicos, tales como céspedes de hoteles, con los que el público entra en contacto directo. ^e En el caso de árboles frutales, se debe suspender el riego dos semanas antes de la recolección de frutas y no se deben recoger del suelo. También se debe evitar el riego por aspersión; el mismo periodo aplica para alimentación de animales con forraje regado con aguas residuales.

TABLA 2. Medidas de control de protección a la salud.

Medida de control	Remoción de patógenos (unidades log)	Comentarios
Tratamiento	1-6	La remoción de patógenos requerida depende de la combinación selectiva de medidas de control para la protección de la salud.
Riego por goteo en cultivos de bajo crecimiento	2	Tubérculos y hortalizas, como lechuga, que crecen justo sobre el suelo con contacto parcial.
Riego por goteo en cultivos de alto crecimiento	4	Cultivos en los que las partes a cosechar no están en contacto con el suelo, como tomates.
Inactivación de patógenos por decaimiento	0,5-2 por día	Es la reducción del número de patógenos por decaimiento que ocurre entre el último riego y el consumo final. La meta en la remoción de unidades log depende de condiciones climáticas (temperatura, intensidad solar), tipo de cultivo, etc.
Lavado con agua	1	Lavado de hortalizas, vegetales y frutas con agua limpia.
Desinfección	2	Lavado de hortalizas, vegetales y frutas con una solución diluida de desinfectante y enjuague con agua limpia.
Pelado	2	Frutas y tubérculos.

Fuente: WHO, 2006

TABLA 3. Guías sugeridas para aguas tratadas en el reuso agrícola y sus requerimientos de tratamiento.

Tipos de reuso agrícola	Calidad del agua residual	Opción de tratamiento
Reuso agrícola en cultivos que se consumen y no se procesan comercialmente	pH 6,5-8,4 DBO <10 mg·L ⁻¹ <2 UNT <14 NMP coli fecal/100 mL* <1 huevos/L (nematodos intestinales)	Secundario Filtración desinfección
Reuso agrícola en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente	pH 6,5-8,4 <30 mg·L ⁻¹ DBO <30 mg·L ⁻¹ SS <200 NMP coli fecal/100 mL	Secundario desinfección
Reuso agrícola en cultivos que no se consumen	pH 6,5-8,4 <30 mg·L ⁻¹ DBO <30 mg·L ⁻¹ SS <200 NMP coli fecal/100 mL	Secundario desinfección

Fuente: FAO, 1999 modificada

DBO, demanda bioquímica de oxígeno; SS, sólidos suspendidos; UNT, unidades nefelométricas de turbidez; RAS, relación adsorción/sodio; NMP, número más probable
* Coliformes fecales NMP/100 mL: media geométrica de más de 10 muestras por mes; ninguna muestra debe ser mayor de 200 NMP/100 mL.

sustancias. En América Latina, algunos países, como Costa Rica (Secretaría de recursos naturales y ambiente, 1997), México (Secretaría de medio ambiente, recursos naturales y pesca, 1997) y Salvador (Ministerio de medio ambiente y recursos naturales, 2000) tienen reglamentado el reuso.

En Colombia, el Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Salud reglamenta los usos del agua y los residuos líquidos,

considerando entre el total de siete al agrícola, entendido como irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias; para ello establece los criterios admisibles para la destinación del recurso (capítulo IV, artículo 40) y los siguientes criterios: “el boro deberá estar entre 0,3 y 4,0 mg B/L, dependiendo del tipo de suelo y de cultivo; el NMP de coliformes totales y fecales no deberá exceder de 5.000/100 mL y 1.000/100 mL, respectivamente, cuando

TABLA 4. Directrices para interpretar la calidad de las aguas de riego.

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción de uso				
		Ninguno	Moderado	Severo		
Salinidad (afecta la disponibilidad de agua para el cultivo)						
Conductividad eléctrica	dS·m ⁻¹	< 0,7	0,7-3,0	> 3,0		
Sólidos suspendidos totales	mg·L ⁻¹	< 450	450-2000	> 2000		
Infiltración (evaluar usando a la vez CE y RAS)						
Relación adsorción/ sodio (RAS)	Conductividad eléctrica (CE)	0-3	dS·m ⁻¹	> 0,7	0,7- 0,2	< 0,2
		3-6	dS·m ⁻¹	> 1,2	1,2-0,3	< 0,3
		6-12	dS·m ⁻¹	> 1,9	1,9-0,5	< 0,5
		12-20	dS·m ⁻¹	> 2,9	2,9-1,3	< 1,3
		20-40	dS·m ⁻¹	> 5,0	5,0-2,9	< 2,9
Toxicidad de iones específicos (afecta cultivos sensibles)						
Sodio (Na)						
	Riego por superficie	RAS	< 3	3-9	> 9	
	Riego por aspersión	meq·L ⁻¹	< 3	> 3		
Cloro (Cl)						
	Riego por superficie	meq·L ⁻¹	< 4	4-10	> 10	
	Riego por aspersión	meq·L ⁻¹	< 3	> 3		
Boro (B)						
		mg·L ⁻¹	< 0,7	0,7-3,0	> 3,0	
Varios (afectan cultivos sensibles)						
Nitrógeno (N-NO ₃ ⁻)		mg·L ⁻¹	< 5	5-30	> 30	
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)						
	Aspersión foliar únicamente	mg·L ⁻¹	< 1,5	1,5-8,5	> 8,5	
pH				Rango normal 6,5-8,4		

Fuente: Ayers y Wescot, 1987

* NO₃-N es el nitrógeno en forma de nitrato, expresado en términos de nitrógeno elemental (en el caso de aguas residuales, incluir el N-NH₄ y el N orgánico)

se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto” (Ministerio de Salud, 1984).

Los criterios de calidad para la irrigación con aguas residuales en la agricultura dependen también del tipo de cultivo: cuando el reuso agrícola se realiza en cultivos que se consumen crudos y no se procesan comercialmente, como es el caso de las hortalizas frescas, el riego es *restringido*; cuando se aplica en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente, como es el caso del tomate enlatado, y en cultivos que no se consumen por el hombre, como pastos, el riego es *no restringido* (OMS, 1989).

La tabla 5 muestra los principales cultivos en los que se aplica el reuso de aguas residuales domésticas en América Latina (Cepis, 2003). En esta tabla se observa que el mayor porcentaje (83,1%) de las aguas residuales es usado prin-

cipalmente en tres tipos de cultivos: hortalizas (30,2%), industriales (29,5%) y forrajes (23,4%). Esta situación es preocupante, pues mientras los cultivos industriales se someten previamente a un proceso de transformación, el forraje lo consumen directamente los animales y las hortalizas, los seres humanos, lo que eleva el riesgo de contaminación microbiológica o parasitológica y, por lo tanto, la generación de problemas de salud pública significativos. La misma situación ocurre para los cultivos de frutales, cuya área regada también representa un elevado porcentaje.

Aguas residuales y reuso

Las aguas residuales contienen material suspendido y componentes disueltos, tanto orgánicos como inorgánicos. Los constituyentes *convencionales* presentes en aguas residuales domésticas son: sólidos suspendidos y coloidales, materia orgánica e inorgánica medida como demanda química y

TABLA 5. Principales cultivos empleados para reuso de aguas residuales domésticas*.

Cultivos regados con agua residual	Área (ha)	Caudal (L·s⁻¹)
Forestales	97	99
Frutales	46,772	40
Industriales	391,418	1,473
Forrajes	6,943	1,172
Hortalizas	48,691	1,511
Otros	806	696
Total	494,727	4991

*Países incluidos: Argentina, Colombia, México, Nicaragua, Perú y República Dominicana. Fuente: Adaptada de Cepis, 2003.

bioquímica de oxígeno (DQO y DBO, respectivamente), carbono orgánico total (COT), nitrógeno (amoniaco, orgánico, nitritos y nitratos), fósforo, bacterias, protozoarios y virus (Metcalf y Eddy, 2003). La cuantificación de estos componentes es condición necesaria para definir una estrategia de tratamiento que garantice técnica y económicamente una calidad del agua residual tratada adecuada para su uso posterior y para minimizar el riesgo potencial para la salud pública y el ambiente.

Debido a problemas como la predominancia de sistemas de alcantarillado combinados (aguas residuales domésticas con aguas lluvias) y a la potencial mezcla con aguas residuales industriales, pueden encontrarse constituyentes *no convencionales* (orgánicos refractarios, orgánicos volátiles, tensoactivos, metales, sólidos disueltos) o *emergentes* (medicinas, detergentes sintéticos, antibióticos veterinarios y humanos, hormonas y esteroides, etc.) (Metcalf y Eddy, 2003). Los riesgos asociados con estas últimas sustancias pueden constituirse en la mayor amenaza para la salud pública en el largo plazo y ser de más difícil manejo que el riesgo causado por los agentes patógenos (Mara y Carnicross, 1990).

En general, el agua residual doméstica presenta valores de pH alrededor de la neutralidad, con una concentración de materia orgánica variable (250-800 mg·L⁻¹ de DQO), según la forma de recolección y disposición de las aguas residuales: *in situ*, en seco, a través de redes de alcantarillado sanitario o combinado, y de aspectos de tipo climático, cultural, socioeconómico, etc. (Mendonça, 2000).

Las concentraciones de nutrientes varían entre 10 y 100 mg·L⁻¹ de N, 5 y 25 mg·L⁻¹ de P y 10 y 40 mg·L⁻¹ de K (Mara y Carnicross, 1990). El N es el nutriente de mayor dinámica en el suelo, cambiando rápidamente de una forma a otra

(mineral, orgánico, diferentes formas iónicas, formas gaseosas y otras), lo que depende de diversos factores, como temperatura, humedad, aireación, ciclos de humectación y secado del suelo, tipo de material orgánico (relación C/N), pH, etc. La mayor parte del N del suelo se encuentra en la forma orgánica y apenas una pequeña cantidad, en formas disponibles de N amoniacal y nitrato (Parreiras, 2005).

La presencia de ciertas formas de nutrientes en las aguas residuales beneficiaría más a algunos cultivos que a otros. Para la aplicación del reuso sobre un cultivo específico, es necesario tener en cuenta aspectos como: la capacidad de asimilación de nutrientes, el consumo de agua, la presencia de iones tóxicos, la concentración relativa de Na y el contenido de sales solubles, ya que en ciertas condiciones climáticas puede salinizarse el suelo y modificarse la composición iónica, alterándole características como el desarrollo vegetativo y la productividad (Pizarro, 1990, citado por Medeiros *et al.*, 2005).

Algunos cultivos, como forrajes perennes y turbas y ciertas especies arbóreas y cultivos, como el maíz, el sorgo y la cebada, requieren una elevada capacidad de asimilación de nutrientes, alto consumo de agua, elevada tolerancia a la humedad del suelo, baja sensibilidad a los constituyentes del agua residual y mínima necesidad de control. Otros cultivos, como leguminosas, la mayoría de cultivos de campo (algodón y cereales) y algunos frutales, como cítricos, manzanos y uvas, no requieren agua en exceso, favoreciendo el reuso de las aguas residuales (Valencia 1998). La tabla 6 muestra el consumo de nutrientes por parte de algunos cultivos.

Tratamiento de aguas residuales y potencialidad de reuso agrícola

La descarga de aguas residuales se ha hecho sin considerar las condiciones del medio donde se ha realizado, siendo el vertimiento directo a los cuerpos de agua superficiales (ríos, lagos y mares) y al suelo los métodos de evacuación de aguas residuales más comunes en la mayoría de ciudades de los países pobres; sin embargo, estas prácticas no respetan las regulaciones municipales o los estándares de calidad para el agua de riego, representando problemas ambientales y riesgos para la salud (Von Sperling, 1996).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se diseñan para producir efluentes que garanticen el cumplimiento de estándares de calidad, de acuerdo con las regulaciones existentes y con el aprovechamiento potencial del efluente, minimizando los problemas de salud pública. El tratamiento se puede clasificar por mecanismos o niveles

–preliminar, primario, secundario y terciario o avanzado– y, dependiendo del proceso para ser usado, varios mecanismos pueden actuar separada o simultáneamente (Von Sperling, 1996). La tabla 7 muestra una relación entre el tipo de contaminante y la eficiencia de remoción que se puede alcanzar en cada uno.

En la reutilización de aguas residuales, el factor que normalmente determina el grado de tratamiento necesario y el nivel de confianza deseado de los procesos y operaciones de tratamiento suele ser el uso para el que se destina el agua; en el caso del reuso agrícola, depende también de la permeabilidad y otras características del suelo y del tipo de cultivo (Gutiérrez, 2003). Las prácticas actuales de uso de aguas residuales en países en desarrollo incluyen comúnmente el uso de aguas residuales diluidas, aunque por lo general no documentada, que implica grandes riesgos para la salud de la población consumidora de productos alimenticios crudos regados con esta agua.

La disposición en el suelo, o reuso, comprende diferentes tipos de irrigación: superficial, subsuperficial o subterránea; en todos los casos de uso de aguas residuales en el suelo es indispensable la aplicación de un cierto nivel de tratamiento, para separar los sólidos y material flotante. Adicionalmente, el tratamiento previene o minimiza los

riesgos de salud por el reuso agrícola de aguas residuales sin tratar.

En Colombia y en general en los países de América Latina, el nivel máximo aplicado es el secundario, por costos y porque los criterios de vertimiento de efluentes en los cuerpos receptores establecidos por sus legislaciones se cumplen con este nivel; en algunos casos se realiza desinfección como etapa final del tratamiento. Países como México usan estos efluentes para riego de jardines y con uso restringido, lo hacen en la industria o en servicios sanitarios. A escala mundial se utiliza el reuso del agua para abastecimiento de agua potable mediante tratamiento a nivel terciario, recargándola en el subsuelo y extrayéndola después de 6 meses ó 2 años, según su nivel de tratamiento (Teorema ambiental, 2003).

Existe una amplia gama de opciones tecnológicas y procesos para el tratamiento de aguas residuales. La tabla 8 muestra el desempeño de las tecnologías más usadas en nuestro medio para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Las aguas residuales tratadas contendrán normalmente menos N y P, pero aproximadamente la misma cantidad de K, según el proceso de tratamiento empleado; así, algunos cultivos tendrán más beneficio que otros, dependiendo de las formas de asimilación de los nutrientes (Mara y Carnicross, 1990). En el caso de cultivos sumergidos, como el

TABLA 6. Consumo de nutrientes por diversos cultivos.

Cultivo	Consumo de nutrientes (kg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)		
	N	P	K
Cultivos de forraje			
Alfalfa	225-538	23-37	174-225
Trébol	178	18	101
Festuca	152-325	30	300
<i>Orchard grass</i>	258-281	23-56	253-353
Cultivos de campo			
Cebada	71	17	23
Maíz	174-193	19-28	108
Caña*	80-200	50-90	100-120
Algodón	74-112	14	39
Sorgo	135	16	70
Papa	260	23	247-323
Soya	106-44	13-21	33-54
Trigo	56-91	17	21-5

Fuente: Metcalf y Eddy, 2003; * González, 2004.

TABLA 7. Características de los principales niveles de tratamiento.

Item	Nivel de tratamiento			
	Preliminar	Primario	Secundario	Terciario
Contaminantes removidos	Sólidos gruesos (basuras, arenas) Grasas Acondicionamiento químico (pH)	Sólidos suspendidos sedimentables Materia orgánica suspendida (parcialmente)	Sólidos no sedimentables Materia orgánica suspendida fina/soluble (parcialmente) Nutrientes (parcialmente) Patógenos (parcialmente)	Contaminantes específicos Materia orgánica fina y soluble (pulimento) Nutrientes patógenos (principalmente)
Eficiencias de remoción	DBO: 0-5% Coliformes: ≈ 0% Nutrientes: ≈ 0%	SS: 60-70% DBO: 30-40% Coliformes: 30-40% Nutrientes: < 20%	SS: 60-99% DBO: 60-99% Coliformes: 60-99% Nutrientes: 10-50%	SS: > 99% DBO: > 99% Coliformes: > 99,9% Nutrientes: > 90%
Mecanismo predominante	Físico	Físico	Biológico o químico	Biológico o químico
Cumple patrón de vertimiento	No	No	Usualmente sí	Sí
Cumple patrón de reuso	No	No	Usualmente sí ¹	Sí ²
Aplicación	Aguas arriba de estaciones de bombeo Etapa inicial del tratamiento Indispensable. Independiente de la complejidad del tratamiento y del uso del efluente (vertimiento o reuso agrícola)	Tratamiento parcial Etapa intermedia de tratamiento Su uso depende del tipo de tratamiento posterior Recomendable en reuso para evitar obstrucción de los sistemas de riego	Tratamiento más completo para remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos Para nutrientes con adaptaciones o inclusión de etapas específicas (parcialmente) Adecuada para aplicación en riego (con desinfección)	Tratamiento completo para remoción de material no biodegradables y disuelto Remoción de nutrientes y coliformes Principalmente, para la remoción de patógenos Sin restricción de uso para cualquier tipo de cultivo

SS, sólidos suspendidos; DBO, demanda bioquímica de oxígeno

¹ Según forma de nitrógeno y aprovechamiento de los cultivos

² Sin restricción para cualquier tipo de cultivo (Parreiras, 2005)

Fuente: adaptada de Von Sperling, 1996; Torres, 2000; Metcalf y Eddy, 2003.

arroz, la falta de oxígeno hace que la mineralización del N se presente en la forma amoniacal, la forma estable en suelos con estas condiciones y por lo tanto la más aprovechable, mientras que en el caso del cultivo de caña es preferible la forma de nitratos (Bernis y Palies, 2008). En el primer caso, los efluentes más recomendables son los provenientes de sistemas anaerobios, en los que ocurre una completa transformación del N a la forma amoniacal, mientras que en el segundo, los sistemas aerobios o combinados anaerobio-aerobios (con nitrificación) garantizan la transformación eficiente a nitratos (Torres, 2001).

Según Parreiras (2005), desde el punto de vista del reuso agrícola, los sistemas de tratamiento de aguas residuales de bajo costo de implementación y operación que pueden asociarse con el uso de sus efluentes tratados en la agricultura,

son los sistemas de lagunas de estabilización (anaerobias, facultativas, de maduración), lagunas de alta tasa, reactores anaerobios de flujo ascendente y manto de lodos (UASB) y la disposición en el suelo.

Blumenthal (2000) definió que para alcanzar una categoría en la que el agua residual pueda emplearse para irrigación de cultivos probablemente consumidos crudos, se puede emplear una serie de lagunas de estabilización (incluyendo laguna de maduración) para lograr alcanzar la calidad microbiológica indicada. Sin embargo, para obtener un agua residual de menor calidad para riego de cultivos industriales sin exposición de los trabajadores, se recomienda un pretratamiento como lo requiere la tecnología de irrigación y al menos una sedimentación primaria.

Desde el punto de vista de microorganismos patógenos, con los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales (sedimentación simple, lodos activados, filtros biológicos, lagunas con aeración mecánica y zanjas de oxidación) no es posible producir un efluente que permita cumplir con las directrices recomendadas por la OMS (1989). Los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales tampoco son eficaces para eliminar los huevos de helmintos y tienen muy poco efecto en los contaminantes químicos de las aguas residuales, requiriéndose tratamientos específicos de nivel terciario.

Aplicaciones del reuso agrícola

A nivel mundial y nacional existen experiencias del reuso agrícola que muestran las bondades de esta aplicación y las consideraciones sobre el tipo o nivel de tratamiento

aplicado al agua residual antes del reuso. En América Latina, sin embargo, un aspecto negativo del reuso agrícola de las aguas residuales, en especial de las aguas residuales sin tratar, es que está muy poco documentado oficialmente (Cepis, 2003).

Experiencias internacionales

En Maracaibo (Venezuela), el efluente de un sistema de lagunas de estabilización, con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 20 días y que trata 1.296.000 L·d⁻¹, fue reutilizado para el riego de una parcela experimental de 5 ha, ocupada con 3 ha de frutales perennes (lima persa, guayaba, mango y níspero) y una superficie dedicada a cultivos de ciclo corto. El comportamiento de las especies irrigadas con este efluente y con agua fresca fue similar y

TABLA 8. Desempeño de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Tecnología de tratamiento	Referencia	Eficiencia de remoción (%)				
		Sólidos suspendidos	DBO	N	P	Coliformes
Tanque séptico	Batalha, 1989	50-70	40-62	< 10	< 10	< 60
Tanque séptico - filtro anaerobio	Von Sperling, 1996		70-90	10-25	10-20	60-90
Tanque séptico - filtro anaerobio - humedal de flujo subsuperficial	Madera <i>et al.</i> , 2005	81-88	71-82	15	15	74-96
Primario avanzado (TPA)	Torres <i>et al.</i> , 2005 Tsukamoto, 2002	73-84	46-70	< 30	75-90	80-90
Filtro anaerobio - filtro de arena	Tonetti <i>et al.</i> , 2005	> 90	90	> 95	-	-
Infiltración lenta	Von Sperling, 1996	-	94-99	65-95	75-99	> 99
Infiltración rápida	Von Sperling, 1996	-	86-98	10-80	30-99	> 99
Infiltración subsuperficial	Von Sperling, 1996	-	90-98	10-40	85-95	> 99
Escurrimiento superficial	Von Sperling, 1996	-	85-95	10-80	20-50	90-99
Laguna facultativa		-	70-85	30-50	20-60	60-99
Laguna anaerobia - laguna facultativa		-	70-90	30-50	20-60	60-99
Laguna anaerobia - humedal	Caicedo, 2005; Osorio, 2006	87-93	80-90	37-48	45-50	-
UASB	Torres, 2000	60-80	60-70	10-25	10-20	60-90
UASB - laguna facultativa	CDMB, 2006	84	88	-	-	-
UASB - lodo activado convencional	Van Haandel y Lettinga, 1994	85-95	85-95	15-25	10-20	70-95
UASB - lodo activado intermitente	Torres, 2000	84-86	87-93	20-90	23-72	-
Lodo activado convencional	Von Sperling, 1996	80-90	85-93	30-40	30-45	60-90
Lodo activado flujo intermitente (RSB)	Von Sperling, 1996	80-90	85-95	30-40	30-45	60-90
Lodo activado aireación prolongada	Von Sperling, 1996	80-90	93-98	15-30	10-20	65-90
Filtro biológico	Von Sperling, 1996	85-95	80-93	30-40	30-45	60-90
Biodiscos	Torres <i>et al.</i> , 2006	85-95	85-93	30-40	30-45	60-90

UASB (*Upflow anaerobic sludge blanket*), reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos; DBO, demanda bioquímica de oxígeno; N, nitrógeno; P, fósforo

no se presentaron problemas de salinidad y/o de Na en el suelo (Trujillo *et al.*, 2000).

Santos *et al.* (2003) evaluaron durante dos años las características hidráulicas de microaspersores al regar el efluente de un sistema UASB y laguna de maduración. Aunque no se observaron variaciones significativas por el uso de este efluente, hubo una falta de uniformidad en la aplicación del agua por acumulación de algas y sólidos suspendidos en los orificios de los microaspersores.

Quipuzco (2004) menciona el uso de reservorios profundos de estabilización, de 8-15 m de profundidad, para almacenamiento estacional y purificación de efluentes parcialmente tratados, provenientes de sistemas como lagunas anaerobias y aerobias, que garantizan eficiencias de remoción de DBO de 90%, detergentes y 3-4 órdenes de magnitud de coliformes fecales y otros contaminantes. Estos efluentes son usados para irrigación restringida de cultivos no comestibles.

Nunes *et al.* (2005) evaluaron el desempeño de un cultivo de pimentón irrigado con tres calidades de agua: efluentes de reactor UASB, de laguna de maduración y agua de pozo. A los tratamientos irrigados con agua de pozo se les aplicó tres formas de fertilización: sin fertilizantes, con la adición de un fertilizante mineral y un fertilizante orgánico. En los resultados de productividad no se observó diferencia significativa para los tratamientos con fertilización mineral u orgánica y los tratamientos regados con los efluentes del UASB. Los resultados obtenidos con el tratamiento irrigado con el efluente de la laguna de maduración no fueron buenos, ya que presentaba un pH >9,0 lo que dificultó el desarrollo del cultivo.

Gorete *et al.* (2005) evaluaron los efectos del riego con aguas residuales provenientes de dos sistemas compuestos por laguna facultativa y humedal con TRH de 7 d y otro por laguna facultativa y filtros con TRH de 8 h, sobre el rendimiento y otras características agronómicas del cultivo de un maíz híbrido. El uso de los dos efluentes no mostró diferencias significativas en los valores de productividad del cultivo.

Medeiros *et al.* (2005) evaluaron las alteraciones químicas en un suelo irrigado con agua residual filtrada en filtros de arena, comparado con otro manejo con la agricultura convencional en un cultivo de café; la aplicación del agua residual filtrada fue más efectiva al mejorar las características del suelo: aumento de pH, materia orgánica, K, Ca y Mg. Sin embargo, se presentaron problemas de salinidad del suelo por el incremento de iones como Na, la conductividad eléctrica y el RAS.

En Portugal se desarrolló un estudio experimental sobre el uso de efluentes de PTAR compuestas por sedimentación primaria y secundaria y lagunas facultativas, en cultivos de sorgo, maíz y girasol, aplicando riego por gravedad y por goteo. Los rendimientos de los cultivos regados con estos efluentes fueron muy similares a los obtenidos al regar sólo con agua potable y al utilizar fertilizantes comerciales, lo que indica que el contenido de N de los efluentes del alcantarillado tiene un valor de fertilización igual a los fertilizantes comerciales, cuando el agua residual tratada se usa para riego (Bau, 1991).

En Tel Aviv, la PTAR de 300.000 m³·d⁻¹ (lodos activados, campos de infiltración de dunas de arena y confinamiento en el suelo alrededor de 400 d) remueve eficientemente materia orgánica y nutrientes (N y P), una variedad de metales pesados, elementos tóxicos, bacterias patógenas y virus (Post, 2006).

Experiencias locales

En Colombia se utilizan aguas residuales crudas o parcialmente tratadas de origen doméstico, pecuario (cría de vacunos y cerdos, especialmente) e inclusive industrial y agroindustrial para el riego de cultivos. En la Sabana de Bogotá, en el distrito de riego y drenaje de la Ramada, se riegan 3.500 ha de cultivos de hortalizas, flores y pastos con un caudal de 1,5 m³ de agua bombeada del río Bogotá, que pasan a través de humedales naturales como forma de tratamiento (Gradex, 1996).

En Ibagué se evaluó la viabilidad de una propuesta para el uso productivo de las aguas residuales. Los cultivos dentro del plan agrícola de reuso serían: arroz, sorgo, pastos, soya, y algodón. La tecnología de tratamiento de aguas residuales seleccionada fue lagunas facultativas con tratamiento preliminar y primario. El total de aguas residuales para tratar fue de 1.438,66 L·s⁻¹. Los principales impactos negativos serían los riesgos para la salud, por el uso indirecto e inseguro de aguas residuales diluidas (Cepis, 2003).

Valencia (1998) y Madera *et al.* (2003) compararon las características de los efluentes de tres sistemas de tratamiento de la estación de transferencia de investigación de Ginebra (Valle): UASB-laguna facultativa, UASB-laguna *duckweed* y laguna de estabilización, encontrando que no hay diferencias significativas en la calidad microbiológica y parasitológica de los tres efluentes, aptos sólo para uso restringido, según la OMS, y que no representan riesgo potencial de toxicidad para los cultivos por sus bajos contenidos de Cl, Na y B.

Osorio (2006) realizó una evaluación teórica de opciones de oferta de agua para riego de cultivos en distritos agroalimentarios proyectados en el Valle del Cauca, tomando como caso de estudio el distrito agroalimentario de Palmira. Los resultados reafirman la viabilidad del uso de las aguas residuales domésticas para riego agrícola, en términos de disponibilidad y control de impacto por las actividades productivas.

Actualmente se evalúa la viabilidad del reuso en el cultivo de caña del efluente de sedimentación primaria y de tratamiento primario avanzado (TPA) de la PTAR Cañaveralejo. En general, la calidad físico-química y microbiológica de estos efluentes no han presentado restricción para reuso; en términos de metales pesados, los análisis han mostrado valores por debajo de los niveles definidos por la EPA (2004) para riego agrícola y, en términos de crecimiento, las unidades experimentales regadas con los efluentes han presentado mejor desempeño que las regadas con agua de pozo (Silva, 2008).

Conclusiones

La agricultura es el principal sector consumidor de recursos hídricos; la disponibilidad hace que en algunas zonas sea necesario emplear otros recursos, como aguas residuales domésticas. Aunque siempre es recomendable tratarlas antes de su uso, en la práctica predomina en todos los países de América Latina el empleo de aguas residuales crudas, diluidas en cuerpos de agua superficiales y, en menor proporción, el de aguas tratadas, aunque no necesariamente de forma adecuada. El empleo seguro en actividades agrícolas requiere un tratamiento y un manejo apropiados.

El reuso de aguas residuales es recomendado principalmente para aquellos cultivos que sufrirán una transformación industrial; sin embargo, en América Latina hay un uso elevado en cultivos de consumo directo, como el de hortalizas, lo que representa riesgos para la salud pública que deben ser considerados.

Independientemente del tipo de cultivo, los requerimientos mínimos para el uso seguro de aguas residuales en la agricultura deben ser los establecidos por la OMS, en términos de variables microbiológicas y de calidad físico-química por la FAO. Además, como en las aguas residuales existen elementos que pueden afectar el desarrollo de los cultivos y las características físico-químicas del suelo, es esencial tener también en cuenta parámetros adicionales, como contenidos de Na, Ca, Mg y B.

La selección de la tecnología de tratamiento del agua residual deberá considerar aspectos como tipo de suelo y de

cultivos para ser regados, ya que la presencia de diferentes formas de N en las aguas residuales dependerá del tipo de tratamiento.

Para garantizar un manejo adecuado de las aguas residuales en actividades agrícolas con un mínimo riesgo, sería recomendable que los países hicieran un manejo integrado de los recursos hídricos, que considere la participación y el compromiso de todos los organismos relacionados con los temas ambientales y agrícolas, como ministerios del ambiente y de agricultura, corporaciones ambientales, instituciones no gubernamentales, instituciones de investigación y el sector productivo.

Literatura citada

- Ayers, R. y D. Wescot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO riego y drenaje 29.1, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma. 174 p.
- Batalha, B. 1989. Fossa séptica. Série de manuais. Companhia de tecnologia de saneamento ambiental, Governo do Estado de Sao Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Brasil. pp. 2-4.
- Bakker, N., M. Dubbeling, U. Gundel, S. Koschella y H. de Zeeuw. (2000). Growing cities. Growing food, urban agriculture on the policy agenda. DSE, Alemania. 3 p.
- Bau, J. 1991. Investigación sobre la conservación del agua en Portugal. Laboratorio. Memorias del seminario sobre usos eficientes del agua, México. pp. 736-743.
- Bernis, F y C. Palies. 2008. Economía del arroz: variedades y mejora. En: www.eumed.net/libros/2006a/fbbp; consulta: mayo de 2008.
- Blumenthal, U.J., D.D. Mara, A. Peasey, G. Ruiz-Palacios y R. Stott. 2000. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines. Bulletin of the World Health Organization 78(9), 1104-1116.
- Caicedo, J. 2005. Effect of operational variables on nitrogen transformations in duckweed stabilization pond. Academic Board of the Unesco-IHE Institute for Water Education for degree of Doctor, Netherlands.
- CDMB (Corporación Autónoma Regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga). 2008. Planta de tratamiento de aguas residuales de río Frío. En: www.cdmb.gov.co; consulta: abril de 2008.
- Cepis (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). 2004. Tratamiento con lagunas. En: www.cepis.ops.oms.org/eswww/fulltext/repind53/arp/arp02.html; consulta: abril de 2008.
- Cepis (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente) y OPS (Organización Panamericana de la Salud). 2004b. Avances del inventario regional de la situación de las aguas residuales domésticas en América Latina. Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América

- Latina: realidad y potencial. Perú. En: www.cepis.ops.oms.org; consulta: septiembre de 2006.
- Cepis (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). 2003. Inventario de la situación actual de las aguas residuales domésticas en Colombia. Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: realidad y potencial. Perú. En: www.cepis.ops.oms.org; consulta: septiembre de 2006.
- EPA (US Environmental Protection Agency). 2004. Guidelines for water reuse. Technology Transfer and Support Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, OH. 245p
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1999. Wastewater treatment and use in agriculture. En: www.fao.org/docrep/T0551E/T0551E00.htm; consulta: enero de 2008.
- FAO y FIDA. 2006. El agua para la alimentación, la agricultura y los medios de vida rurales. En: El agua, una responsabilidad compartida. 2° Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. Resumen ejecutivo. 47 p. En: www.unesco.org/water/wwap/index_es.shtml; consulta: septiembre de 2006.
- González, M. 2004. Cultivo extensivos. Tecnológico de Monterrey. En: www.gro.itesm/agronomia2/extensivos; consulta: septiembre de 2006.
- Gorete, P.M., D.A. Da Silva, C.O. De Andrade, y H.N. De Souza. (2005). Fertilización de milho com águas residuárias, no semi-árido nordestino. ABES, Rio Grande, Brasil. 8 p.
- Gradex. 1996. Estudio de impacto ambiental Distrito de riego Girardot-Tocaima. Instituto Nacional de Adecuación de Tierras (INAT), Bogotá.
- Gutiérrez, J. 2003. Reuso de agua y nutrientes. Centro de información, gestión y educación ambiental (Cigea). En: www.medioambiente.cu/revistama/articulo41.htm; consulta: septiembre de 2006.
- Lara, J.A. y A. Hernández. 2003. Reutilización de aguas residuales: aprovechamiento de los nutrientes en riego agrícola. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Instituto Cinara, Universidad del Valle. pp. 237-242.
- Madera, C., P.V. Steen y H. Gijzen. 2003. Comparison of the agronomic quality of effluents from conventional and duckweed waste stabilisation ponds for reuse in irrigation. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas y sus implicaciones ambientales y de salud pública. Cartagena (Colombia).
- Madera, C., J.P. Silva y R. Peña. 2005. Sistemas combinados para el tratamiento de aguas residuales basados en tanques sépticos-filtro anaerobio y humedales subsuperficiales. Revista Ingeniería y Competitividad 7(2), 5-10.
- Mara, D. y S. Carnicross. 1990. Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura. Organización Mundial de la Salud (OMS), Ginebra.
- Mara, D. 1996. Waste stabilization ponds: effluent quality requirements and implications for process design. Wat. Sci. Tech. 33(7), 23-31.
- Medeiros, S., A. Soares, P. Ferreira, J. Neves, A. de Matos y J. de Souza. 2005. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: estudo das alterações químicas do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 9(4), 603-612.
- Mendonça, S. 2000. Sistemas de lagunas de estabilización. McGraw-Hill. 370 p
- Metcalf y Eddy. 2003. Waste engineering: treatment and reuse. 4th ed. McGraw-Hill, Nueva York. 1819 p.
- Ministerio del Medio Ambiente. 2001. Guía técnica para el desarrollo de proyectos de reuso de aguas residuales domésticas municipales. Bogotá.
- Ministerio de Salud. 1984. Decreto N° 1594. Reglamentación de los vertimientos de los desechos líquidos. Bogotá.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2000. Decreto N° 39. Reglamento especial de aguas residuales. El Salvador.
- Moscoso, J. 1993. Reuso de aguas residuales en Perú. Taller regional para América sobre aspectos de salud, agricultura y medio ambiente, México.
- Nunes, I.J., T. De Sousa, V.L. Duarte, J.F. Fideles y J.D. Pires. 2005. Utilização de esgotos tratados no desenvolvimento da cultura pimentão (*Capsicum annum* L.). ABES, Campina Grande, (Brasil).
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 1989. Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Serie Informes técnicos, 778. Organización Mundial de la Salud (OMS), Ginebra. 93 p.
- Osorio, J. 2006. Estrategia de evaluación de usos conjuntivos del agua, incluyendo reuso para contribuir con la seguridad alimentaria de distritos agroalimentarios proyectados en el Valle del Cauca, Colombia. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali.
- Parreiras, S. 2005. Curso sobre tratamento de esgoto por disposicao no solo. Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), Belo Horizonte (Brasil). 40 p.
- Post, J. 2006. Wastewater treatment and reuse in the eastern mediterranean region. Water 21, 36-41,
- Pierce D. y K. Turner. 1990. Economics resources and the environment. John Hopkins Press, Washington D.C.
- Quiquico, L.E. 2004. Valoración de las aguas residuales en Israel como un recurso agrícola: consideraciones a tomar en cuenta para la gestión del agua en Perú. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, San Marcos 7(13), 64-72.
- Santos, C., V. de Lima, J. de Matos, A. van Haandel y C. Azevedo. 2003. Efeito do uso de água residuária sobre a vazão de microaspersores. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 7(3), 577-580.

- Scott, C, N.I. Faruqui y L. Raschid. 2004. Wastewater use in irrigated agriculture: confronting the livelihood and environmental realities. IWMI, IDRC, CABI, Sri Lanka. 240 p.
- Secretaría de medio ambiente, recursos naturales y pesca. 1997. Norma oficial mexicana NOM-003-ECOL-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. México.
- Secretaria de recursos naturales y ambiente. 1997. Decreto ejecutivo 26042-S-MINAE. Reglamento para regular las descargas y reuso de aguas residuales. Costa Rica.
- Silva, J. 2008. Reuso del agua residual tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo PTAR-C en el cultivo de caña de azúcar. Tesis de maestría (en desarrollo). Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali.
- Teorema Ambiental. 2003. Estirar el agua mediante su uso eficiente y reuso. Revista técnica teorema ambiental N° 38. En: www.teorema.com.mx/articulos.php?id_sec=42&id_art=1767&id_ejemplar=72; consulta: junio de 2008.
- Tonetti, A., B. Coraucci, R. Stefanutti, R. Feijó y C. Okano. 2005. Remoção de matéria orgânica, coliformes totais e nitrificação no tratamento de esgotos domésticos por filtros de areia. Revista Eng. Sanit. Ambient. 10(3), 209-218.
- Torres P. 2001. Tratamiento de esgoto sanitario em sistema combinado anaeróbico (UASB-RSB). Tesis doctoral. Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de Sao Paulo, Sao Carlos (Brasil).
- Torres, P., A. Pérez, J. Escobar, L. Barrios y C. Acosta. 2005. Optimización del tratamiento químico de las aguas residuales de la ciudad de Cali con diagramas de coagulación-floculación. Revista Epiciclos 4(1), 113-125.
- Torres, P., J. Cerón, R. Pomar y C. Madera. 2006. Evaluación de alternativas biológicas para el tratamiento secundario del efluente de la PTAR-C. Proyecto de investigación Empresas Públicas de Cali (Emcali) y Universidad del Valle, Cali.
- Trujillo, A, C. Cárdenas de Flores, M. Valbuena, L. Herrera, I. Araujo y L. Saules. 2000. Tratamiento de aguas residuales en el trópico mediante lagunas de estabilización y su reuso para riego agrícola XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. AIDIS/ABES, Porto Alegre.
- Tsukamoto, R. 2002. Tratamiento primario avanzado: el paradigma moderno del tratamiento de aguas residuales sanitarias. Acodal, Cali.
- Van Haandel, A y G. Lettinga, 1994. Anaerobic sewage treatment. A practical guide for regions with a hot climate. John Wiley and Sons, Reino Unido.
- Valencia, E. 1998. Potencialidad del reuso del efluente de una laguna facultativa en irrigación comparación de la producción utilizando dos hortalizas regadas con efluente y agua subterránea. Universidad del Valle, Cali.
- Von Sperling, M. 1996. Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de engenharia sanitária e ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.
- WHO (World Health Organization). 1989. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Report of a WHO Scientific Group. WHO Technical Report Series 778.
- WHO (World Health Organization). 2006. Guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater. Vol. 2. Wastewater use in agriculture. 191 p.
- WSP (Water and Sanitation Program), Banco Mundial, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (Cosud), Unicef y Banco Interamericano para el Desarrollo (Bid). 2007. Saneamiento para el desarrollo. Cómo estamos en 21 países de América Latina y el Caribe. Conferencia Latinoamericana de Saneamiento, Cali.