

AVANCES EN EL SANEAMIENTO Y LA GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA

Advances in sanitation and biosolids management in Colombia

Mayra Alejandra Rodríguez González¹
Juan Manuel González Guzmán²
David Andrés Camargo Mayorga³

¹Asistente de investigación, Universidad Militar Nueva Granada.

²Docente investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada.

³Docente investigador de la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Militar Nueva Granada.

Recibido: 15 de mayo 2019 // Aceptado: 28 de junio de 2019 // Publicado: 8 de julio de 2019

Artículo derivado del proyecto de investigación INV-ECO-2333 "Análisis económico del proceso de vermicompostaje como alternativa de disposición eficiente para biosólidos PTAR UMNG (Cajicá)." financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada en la vigencia 2017.

Resumen

Este artículo presenta un análisis sobre los sistemas de saneamiento y estudios de caso relacionados con la gestión de biosólidos en Colombia. Con el desarrollo tanto rural como urbano, los servicios de acueducto y alcantarillado se han expandido y mejorado la cobertura, pero los servicios para el tratamiento de aguas residuales en las ciudades solo cubren del 20 al 25 % de toda la demanda. Las plantas funcionales permiten disminuir la carga contaminante de estas aguas evitando la contaminación de la red hídrica donde son vertidas. Durante este proceso se generan subproductos como gas y lodo. Este último, presenta características que lo hacen viable para reutilización, por lo cual se denomina biosólido y puede ser aprovechado siguiendo las normativas a nivel nacional e internacional. Teniendo en cuenta que la construcción de las primeras plantas de tratamiento primario y secundario se llevaron a cabo en Bogotá y Medellín respectivamente, son estas un ejemplo claro de la situación en cuanto a la gestión de biosólidos, donde se puede observar que este aún se encuentra en un estado de ensayo y error, es decir, en una etapa preliminar con respecto a otros países de Latinoamérica.

Palabras claves

saneamiento, alcantarillado, tratamiento de aguas residuales, biosólidos, gestión, suelos.

Abstract

This article presents an analysis on the sanitation systems and case studies related to the management of biosolids in Colombia. With both rural and urban development, water supply and sewerage services have expanded and improved coverage, but services for wastewater treatment in cities only cover 20% to 25% of all demand. The functional plants allow to reduce the pollutant load of these waters avoiding the contamination of the hydric network where they are discharged. During this process, byproducts such as gas and sludge are generated. This latter waste has characteristics that make it viable for reuse, which is why it is called biosolid and can be utilized by following the national and international regulations. Considering that the construction of the first primary and secondary treatment plants was carried out in Bogotá and Medellín respectively, they are a clear example of the situation regarding the management of biosolids where it can be observed that this is still in a state of trial and error, that is, preliminary stage with respect to other Latin American countries.

Key words

sanitation, sewage, wastewater treatment, biosolids, management, soils.

*Autor para correspondencia: david.camargo@unimilitar.edu.co

Cómo citar

Rodríguez González, M. A., González Guzmán, J. M., & Camargo Mayorga, D. A. (2019). Avances en el saneamiento y la gestión de biosólidos en Colombia. *Revista FACCEA*, Universidad de la Amazonia, Vol. 9(2), 113 - 126. <https://doi.org/10.47874/faccea.v9n2a4>



Este artículo puede compartirse bajo la Licencia Creative Commons Atribución-NonComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Introducción

Dentro los principales recursos para llevar a cabo tanto las actividades diarias domésticas como industriales, se encuentra el agua. A nivel mundial, para 2003 se extraía en promedio el 8% del total de agua dulce renovable y se hacía uso del 54% de las aguas de escorrentía. No obstante, el consumo per cápita se ha incrementado y las fuentes reducido debido a la falta de tratamiento del agua residual y la contaminación de las fuentes naturales por los residuos que son vertidos en áreas aledañas sin tratamiento (ONU, 2003; UNESCO, 2017).

En los países con ingresos altos, aproximadamente el 70% de las aguas residuales municipales e industriales son sometidas a un proceso de tratamiento, aquellos de ingresos medios entre un 38% - 28%, mientras los de bajos ingresos solo alcanzan el 8%. Alrededor del 60% de la población a nivel mundial tiene acceso a un sistema de drenaje, pese a ello, un bajo porcentaje del presupuesto destinado a estos sistemas es dirigido a la construcción de sistemas de depuración como lo son, las Plantas de Tratamiento de aguas residuales (PTAR) (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012; UNESCO, 2017).

Las PTAR permiten disminuir la carga de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos y mejorar el aspecto del efluente, sin embargo, dentro de este proceso se generan subproductos (lodos y gas) que son considerados como residuos y deben sometidos a procesos de tratamiento bajo un manejo específico para evitar la contaminación del medio. En el caso de los lodos, de acuerdo con el tratamiento elegido por la planta, puede llegar a demandar entre un 20 – 60% del total del presupuesto del funcionamiento de esta (Torres, 2004; Andreoli & Von, 2007; LeBlanc, Richard, & Beecher, 2009).

En general, la composición del lodo varía según la fuente de agua residual que ingresa a la PTAR, pues se originan en los procesos que involucran la sedimentación de partículas. Al ser considerados como residuo, su principal destino de disposición final son los rellenos sanitarios, en menor proporción, algunos países incluyen procesos de incineración, así como

vitrificación y ceramización. Sin embargo, en su composición se halla presencia de materia orgánica, elementos como Nitrógeno, Potasio, Fósforo y otros que favorecen el desarrollo de plantas, aunque también se encuentra presencia de microorganismos patógenos como *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., huevos de helminto, virus entéricos, entre otros y metales pesados, por lo cual el manejo inadecuado puede causar problemas de contaminación y de salubridad en la población (Walker, Knight y Stein, 1994; Mahamud, Gutiérrez y Sastre, 1996; Torres 2004; Potisek, Viramontes y Ibarra, 2005; Andreoli y Von, 2007; Evans, 2012 y UNESCO, 2017).

De allí la importancia de cuantificar en los activos y pasivos los efectos ambientales favorables y desfavorables, tal como lo expresa Hernandez, *et al.*, (2017) reconociendo la contabilidad ambiental como un conjunto de revelaciones en los activos y pasivo que deben estar expresados en los estados financieros. En esta medida gestión de los costos ambientales requiere un cambio de visión en cuanto a la forma como se analiza la organización como un todo, de tal manera que en dicho análisis sean incluidos tanto los costos organizacionales como los costos ambientales en los que aquella incurre, Terreros (2014).

Por lo anterior, diferentes países han buscado desarrollar e implementar iniciativas para aprovecharlos, disminuyendo los pasivos ambientales que se generan por su acumulación. Dentro de estas se encuentra la aplicación en suelos, uso como enmienda orgánica, producción de energía, etc., regidos bajo normativas que evitan los riesgos de contaminación. Una vez son considerados susceptibles de darles un valor agregado, se denominan biosólidos (aquellos lodos que pueden ser usados sin causar efectos nocivos) (Walker *et al.*, 1994; Mahamud, Gutiérrez y Sastre, 1996; LeBlanc *et al.*, 2009).

En Colombia, en las últimas décadas se han comenzado a realizar esfuerzos por darle un nuevo uso a estos residuos, y solo hasta 2014 se planteó una normativa que regula su uso en suelos a nivel nacional. De igual manera es pertinente hablar de la responsabilidad social empresarial en el manejo de residuos de este tipo, tal

como lo expresa Diaz & Bernal (2017) quien considera que cuando se habla de responsabilidad social empresarial este es un tema bastante amplio que abarca distintos públicos o usuarios de interés, principalmente la sociedad o sector, pues en esta es donde se desarrollan todas sus actividades y procesos. Por ello, como objetivo de esta investigación se planteó llevar a cabo una revisión en lo relacionado con la gestión de biosólidos en el país, especialmente en las ciudades más importantes, lo que en palabras de Vélez Zuluaga (2007) puede ser un desafío su tratamiento.

Este documento consta de una revisión sobre los progresos en los sistemas de saneamiento básico en el país, lo cual permitirá comprender el retraso en cuanto a la gestión de lodos y biosólidos, la legislación vigente sobre biosólidos, así como la producción y metodologías para su gestión que se han llevado a cabo hasta la fecha en las principales ciudades, finalmente se presentan las conclusiones del análisis.

Metodología

La revisión de literatura sobre la gestión de biosólidos en Colombia comprendió un periodo de observación hasta el año 2017, e incluyó información para dos ciudades:

Bogotá y Medellín. Para tal fin, los artículos, documentos de trabajo, boletines y demás textos en el área temática, se ubicaron usando los siguientes términos: saneamiento, PTAR, biosólidos, aguas residuales, Colombia.

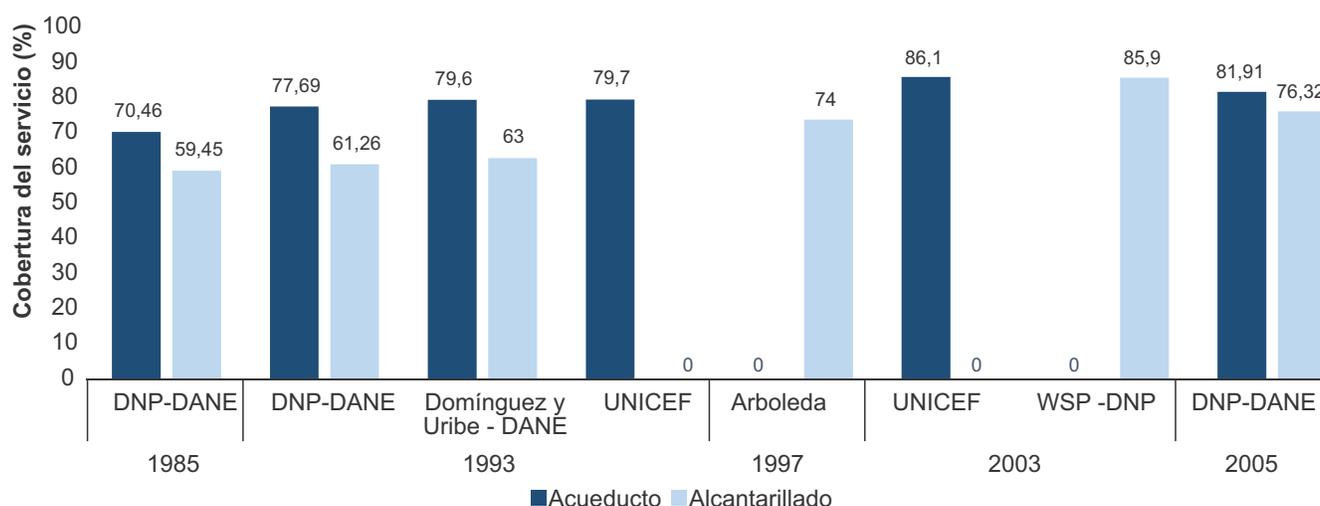
Realizada la búsqueda en diferentes bases de datos académicas (Google Scholar, EBSCO, Dialnet, SciELO, Redalyc, ScienceDirect), se procedió a seleccionar los documentos más relacionados con el tema de interés. A partir de las fuentes más importantes, se aplicó el marco metodológico para el análisis de textos propuesto por Roncancio, Camargo y Muñoz (2017). Según Van Dijk (2005) se identificaron las estructuras semánticas del discurso inmerso en los textos.

Saneamiento en Colombia

Una de las razones por las cuales Colombia ha tenido demoras en cuanto a la gestión de lodos y biosólidos, se debe a la baja cobertura de los sistemas de saneamiento básico que contemplan tanto el acueducto (acceso de las personas al agua) como el alcantarillado (aguas residuales). Por ello, se hace un recuento del avance de estos sistemas y así comprender la situación en la que se encuentran, lo cual se relaciona directamente con la producción de estos residuos.

Figura 1.

Datos del porcentaje de cobertura en los servicios de acueducto y alcantarillado de 1985 a 2005 en Colombia. (Aquellos datos que se encuentran en “cero” se debe a la ausencia de valores). DNP-DANE (publicación del DNP basado en DANE); Domínguez y Uribe (publicación de Domínguez y Uribe Basado en DANE); UNICEF (publicación UNICEF con Datos del DNP basados en el Censo 1993 y ECV 2003 de DANE); Arboleda (Ninguna fuente citada); WSP -DNP (publicación WSP basado en estimaciones del DNP).



Fuente: Elaboración propia a partir de DNP (2014); Domínguez & Uribe (2005); Luis Fernando (2000); UNICEF (2010); WSP, Mundial, Cosude, UNICEF & BID (2007).

Como se ha visualizado a nivel mundial, en Colombia se presentó un aumento en la población especialmente en el área urbana, por lo cual fue necesario acelerar los procesos de planificación y desarrollo, dando prioridad a la ampliación de las ciudades y con ello a la infraestructura de acueducto y alcantarillado. Dentro del periodo de 1938 y 1993 la población pasó de 8.701.816 (DANE, 1941) a 33.109.840 habitantes (DANE, 1993) y los servicios de acueducto y alcantarillado pasaron de cubrir del 11,2% al 79,6% y del 6,7% al 63,0%, respectivamente. (Domínguez & Uribe, 2005).

Los avances en los años 90, sumados a la tentativa de asegurar un medio ambiente sano y seguro como se planteó en el objetivo 7 de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) (United Nation, 2017). Le permitieron a Colombia establecer metas como: “Reducir a la mitad, para el año 2015 el porcentaje de personas sin acceso sostenible al agua potable y a servicios básicos de saneamiento”, es decir, alcanzar el 99% de cobertura del acueducto en áreas urbanas, 78% en áreas rurales, 93 % en cobertura de alcantarillado urbano y 72 % en área rural. (Consejo Nacional de Política Economía y Social, 2005; DNP, 2014).

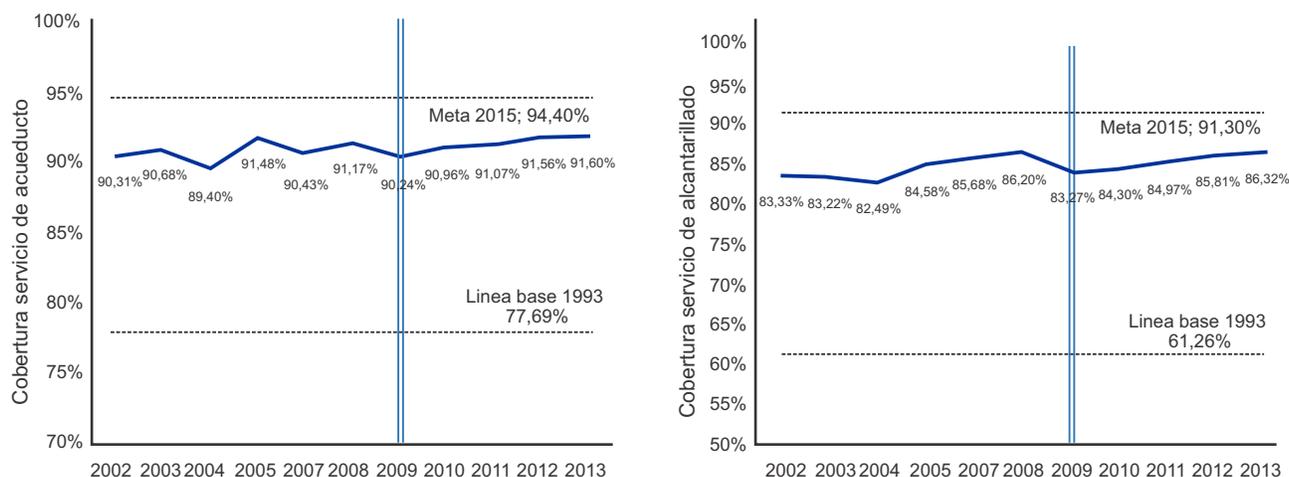
Pese a ello, debido a la falta de registros anuales, el seguimiento de estos objetivos se encuentra supeditados a los censos, encuestas y otros procedimientos llevados a cabo entidades gubernamentales como el Departamento

Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Sin embargo, al analizar la información se encuentran discrepancias que generan incertidumbre sobre la veracidad de los datos, como se observa en la Figura 1. En esta, para el año 1993 tanto UNICEF (2010) como la Dirección Nacional de Planeación (DNP, 2014) y Domínguez y Uribe (2005) plantean el uso del censo llevado a cabo por el DANE como fuente de información, aun así, presentan datos diferentes. En 2003 UNICEF reporta el uso del Censo del DANE del año mencionado, mientras el WSP (Water and Sanitation Program por sus siglas en inglés) referencia los estimados del DNP, no obstante, al ser entidades gubernamentales del mismo estado se esperaba que la información coincidiera.

A pesar de las disparidades en la información, es posible identificar mejoras en el alcance de los servicios de acueducto y alcantarillado del país, aun cuando se evidencian disminución en algunos años como se puede ver en la Figura 2, probablemente por eventos climáticos, inconvenientes administrativos, presupuestales y de funcionamiento que no “destruyen” o disminuyen la infraestructura, sino que afecta su correcto funcionamiento. Específicamente en lo relacionado al alcantarillado, se puede afirmar que la captación y el direccionamiento de las aguas residuales ha mejorado, sin involucrar el desarrollo de los sistemas de tratamiento como las PTAR.

En lo concerniente a los sistemas de tratamiento, para

Figura 2.
Cobertura servicios de acueducto y alcantarillado de 2001 a 2013 en Colombia.



Fuente: DNP (2014).

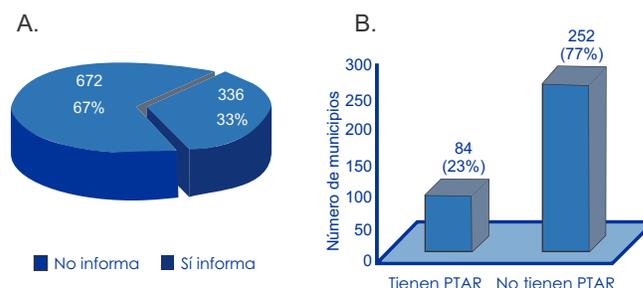
1999 solo el 4% de los vertimientos netos generados por actividades domésticas fueron tratados y el caudal de aguas residuales vertido a cuerpos de agua fue cercano a los 67 m³/s; donde Bogotá aportó aproximadamente el 15,3%, Antioquia el 13%, Valle del Cauca 9,9 % y los demás menos del 5%. (Pérez, Bonilla, Acevedo Arias, Rivera, & Muñoz, 2004; UNICEF, 2010).

Con el fin de complementar el sistema de alcantarillado y disminuir el impacto ambiental generado por el vertimiento de aguas residuales al medio, se llevaron a cabo esfuerzos por incrementar el número de sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR). Para finales de los años 90 se tenían cerca de 237 STAR distribuidas en 235 municipios (21,7%), aunque en ciudades como Bogotá, Cali y Medellín solo se cubren al 25% de la población (Pérez *et al.*, 2004). Al 2003 ya se había incrementado a 410 STAR en 354 municipios (32,2%), pese a esto, no es claro que porcentaje de la cobertura de alcantarillado llega a cada sistema, la cantidad de vertimientos de aguas industriales, así como su eficiencia en el proceso de depuración en todos los sistemas (WSP *et al.*, 2007).

Para el 2010 el 43,8% de los municipios cuenta con una PTAR, representado en 556 plantas ubicadas especialmente en Cundinamarca y Antioquia, con una capacidad instalada promedio de 33,2 m³/s. No obstante, la ausencia de información sobre el funcionamiento y eficiencia de las PTAR en el área nacional se debe, en primer lugar, a la presencia o no de algún STAR y en segundo, al reporte sobre su funcionamiento por parte de los municipios; solo el 33% informaban sobre su situación para como se muestra en la figura 3.

De acuerdo con el Ministerio de Vivienda el tratamiento de aguas residuales en Colombia se ha incrementado a 42 % (C. y T. de C. Ministerio de Vivienda, 2017), esto implica que más de la mitad del agua residual producida no tienen una gestión adecuada. Según la Asociación Colombiana de Ingeniería (Acodal) solo el 30% de las ciudades colombianas cuentan con un sistemas de tratamiento (Sierra, 2017). Esto, ya que solo el 31% de las ciudades tiene un STAR o PTAR, en su mayoría de tipo primario (29%) (El tiempo, 2017). Entonces, la deficiencia en este tipo de infraestructura lleva a la necesidad de analizar de forma prioritaria alternativas para gestionar adecuadamente el restante de aguas

Figura 3. A. Porcentaje de Municipios que informan sobre las PTAR. B. Municipios que tienen un PTAR (de aquellos que informan).



Fuente: UNICEF (2010).

residuales que no son sometidas a algún tratamiento y son vertidas en fuentes hídricas creando contaminación al medio ambiente, más que al apropiado manejo de los residuos generados en el proceso de tratamiento.

Cabe resaltar que la ampliación de la cobertura del servicio de alcantarillado sin incremento de STAR, generará descargas con mayor concentración que pueden afectar la efectividad en la remoción de contaminantes orgánicos durante el tratamiento o mayor contaminación para las fuentes hídricas y sus alrededores cuando son vertidas directamente al entorno.

Normatividad sobre biosólidos

Los biosólidos han sido definidos como un “producto sólido orgánico producido por los procesos de tratamiento de aguas residuales que pueden ser benéficamente reciclados” según Walker *et al.* (1994). También, como “cualquier sólido, semi-sólido o líquido de desecho generado por una planta municipal, comercial o industrial de tratamiento de aguas residuales, de aguas de consumo o instalaciones de control de la contaminación atmosférica u otra clase de desechos de similares características y efectos” de acuerdo con López, Gutiérrez Lavín & Sastre Andrés, (1996). Para 2009 la definición del Atlas de Biosólidos hace referencia a estos como “la materia orgánica sólida recuperada del proceso de tratamiento de agua residual y usada, especialmente como abono” (LeBlanc *et al.*, 2009; López *et al.*, 1996; Walker *et al.*, 1994).

En Colombia, la primera definición cercana se encuentra en la Resolución 1096 de 2000 (Tabla 1), haciendo referencia al lodo o “*suspensión de materiales en un líquido proveniente del tratamiento de aguas residuales, del tratamiento de efluentes líquidos o de cualquier actividad que lo genere*”. Solo hasta el Decreto 1287 de 2014 se define lodo como la “*suspensión de un sólido en un líquido proveniente del tratamiento de aguas residuales municipales*” y biosólido como el “*producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de os lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su uso*”. Además, aclara que aquellos residuos como escorias y cenizas producto de la oxidación o procesos térmicos aplicados a biosólidos y los residuos de fases preliminares o limpieza de sumideros no se incluyen en la definición (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000; C. Y. T. Ministerio de Vivienda, 2014).

Sin embargo, se hace referencia al término de lodos u otras sustancias provenientes del sistema de tratamiento de agua como “Lodo biológico” en el Reglamento Técnico del Agua Potable y saneamiento Básico (RAS) de 1998. Subsecuentemente, el Decreto 1594 de 1984 (derogado por el art. 79, Decreto Nacional 3930 de 2010, salvo los arts. 20 y 21), lo define como “*el excedente que se genera en los procesos biológicos de las aguas residuales en el cual se presenta una reglamentación parcial del uso del agua y los residuos líquidos*” (MINSALUD, 1984). Solo hasta la Resolución 1096 de 2000 (derogada por el art. 258, Resolución Min. Ambiente 330 de 2017) se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento

Tabla 1.
Normatividad relacionada con lodos y biosólidos en Colombia

Norma	Aporte
Decreto 1594 de 1984	Definición de lodo
RAS 1998	Definición de lodo biológico
Resolución 1096 de 2000	Manejo de lodo
Decreto 3930 de 2010	Definición de lodos
NTC 5167 de 2011	Posibilidad de uso de lodos como enmienda
Decreto 1287 de 2014	Definición de lodo y biosólido, manejo de biosólidos
Decreto 1077 de 2015	Ratifica Decreto 1287

Básico conocido como RA, en esta se retoma el término en el capítulo XIII correspondiente a los sistemas de potabilización de aguas, haciendo mención al manejo de lodos derivados de los procesos de sedimentación y filtración de las plantas de tratamiento. En este mismo capítulo se alude a las formas de disposición y vertimiento en corrientes de agua o alcantarillados o en caso contrario deben pasar por un proceso de secado y posterior disposición final (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000; MINSALUD, 1984).

En el Decreto 3930 de 2010 se presenta un reglamento parcial del uso del agua y residuos líquidos, así como otras disposiciones. En este la definición del lodo varía, refiriéndose a “*la suspensión de un sólido en un líquido proveniente de tratamiento de aguas, residuos líquidos u otros similares*” (Parra, 2010)

Dentro del Decreto 1287 de 2014 se menciona además las variables químicas (metales pesados) y biológicas (microorganismos nocivos) que deben ser evaluadas, los límites máximos permisibles y su reutilización, de acuerdo con los dos tipos de biosólidos establecidos. En caso de no cumplir con estos límites, no se podrá hacer uso del lodo como materia prima y por tanto será considerado como lodo y no biosólido, siendo necesario un tratamiento adicional para mejorar su composición.

Teniendo en cuenta que los parámetros legales solo se establecieron hasta el 2014 y con el fin de llevar un control sobre los biosólidos, hasta esa fecha se usó la reglamentación planteada por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés). Esta regulación específica desde 1993 estándares para la disposición y uso de los lodos provenientes de agua residual en el título 40 del Código Federal de Regulaciones (CFR) parte 503, definiendo biosólidos como “*un producto sólido orgánico derivado de los procesos de tratamiento de aguas residuales que pueden ser reciclados beneficiosamente*”.

De igual forma se plantea una clasificación de acuerdo con el contenido de metales pesados y microorganismos nocivos, que sirvió de modelo para el Decreto 1287. Así como los posibles usos que se pueden dar a estos residuos, especialmente para su aplicación en suelos, razón por la cual en el país ya se habían realizado avances para su aprovechamiento, como se puede observar en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167

de 2011 que regula los productos para la industria agrícola, incluyendo fertilizantes, abonos y enmiendas, entre otros. (ICONTEC, 2011; Walker *et al.*, 1994).

Dentro de la NTC 5167 se puede considerar el uso de biosólidos como posible abono orgánico. En el apartado de fertilizantes o abonos orgánicos – minerales sólidos, se menciona que puede ser lodo proveniente del tratamiento de aguas residuales con porcentajes mínimos de materia orgánica y otros parámetros, que incluyen contenido de macronutrientes, pH, metales pesados, etc. A la par, es incluido en el apartado que fija los elementos para enmiendas orgánicas no húmicas, mencionando los productos orgánicos sólidos deshidratados y estabilizados de las plantas industriales y de aguas residuales tanto industriales como urbanas al cumplir ciertos parámetros que incluyen metales pesados, materia orgánica, pH, conductividad, etc. (ICONTEC, 2011)

Teniendo en cuenta los enfoques en el aprovechamiento de biosólidos como elemento orgánico para ser dispuestos en suelos a nivel internacional, los esfuerzos en el país se dirigieron hacia esta dirección. No obstante, al visualizar los avances no solo se hizo necesario adecuar los niveles permitidos a la realidad nacional, sino incluir el componente biológico que puede causar efectos secundarios de acuerdo con la actividad de reutilización y ampliar el espectro hacia otras alternativas como posible material de fuente energética o para construcción.

Gestión de biosólidos

En Colombia como ya se mostro, los niveles de sanidad no cubren la totalidad de su demanda y el bajo reporte de datos por parte de los municipios, hace que la información no esté disponible, por ello, solo se analizaran la producción y gestión de las PTAR ubicadas en las ciudades principales como Bogotá y Medellín.

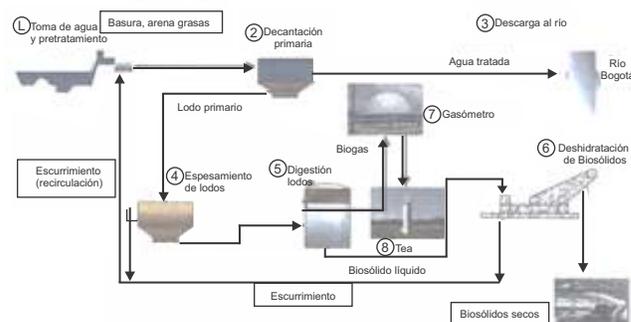
Bogotá: planta de tratamiento de aguas residuales Salitre

En la ciudad se construyó la primera planta de tratamiento de Colombia llamada Vitelma entre 1933 y 1938 como una alternativa para mejorar la calidad de agua en la ciudad. (Osorio, 2008). Sin embargo, hasta 1994 se dio inicio al proceso de diseño de la PTAR El Salitre, construida desde 1997 al año 2000, cuando entró en funcionamiento (EAB, 2013).

A pesar de albergar una población de 8 millones aproximadamente, Bogotá solo cuenta con esta PTAR en funcionamiento, apta para el tratamiento de $4\text{m}^3/\text{s}$ en promedio de aguas residuales (capacidad instalada de $5,5\text{m}^3/\text{s}$) cubriendo los efluentes de 2'200 mil habitantes, correspondiente al 20% de la población. No obstante, se generan $15\text{m}^3/\text{s}$ de aguas residuales en la ciudad que ingresan casi en su totalidad a la planta, afectando la eficiencia del tratamiento (Cortés & Sánchez, 2014; EAB, 2013).

La fase I de la planta, hasta la fecha funciona empleando un tratamiento primario químicamente asistido que implica los siguientes procesos, su esquema general se muestra en la figura 4 (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2012; EAB, 2013):

Figura 4.
Esquema general de funcionamiento PTAR Salitre.



Fuente: CAR- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2012, p. 18).

- ✓ **Captación:** Cuenta con una compuerta que permite el ingreso del agua residual con un flujo de $10\text{m}^3/\text{s}$, elevada a 9,5 m por tornillos gravitacionales para su tratamiento.
- ✓ **Cribado:** se lleva a cabo por un sistema de rejillas que permite filtrar residuos sólidos en un rango de 10 cm y 2,5 cm. Estos son acumulados y direccionados al Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ).
- ✓ **Desarenado y desengrasado:** el desarenado se lleva a cabo por decantación y desarenado por flotación, usando removidos raspadores de grasa y bombas succionadoras de arena para su eliminación. En esta etapa también se adiciona el coagulante (cloruro férrico) y el coagulante (polielectrolito aniónico) para

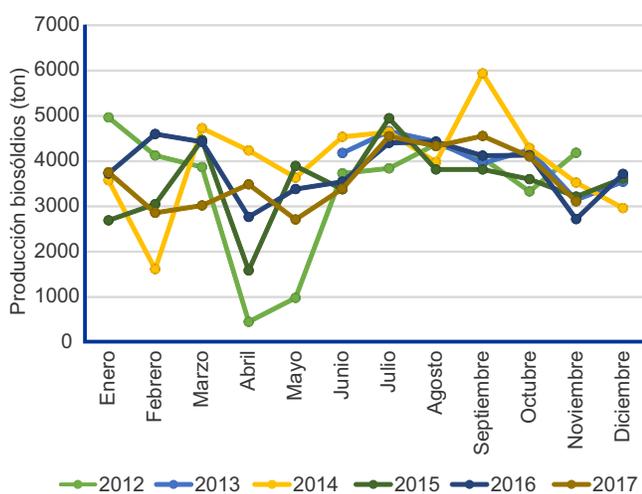
favorecer el siguiente paso.

- ✓ **Sedimentación primaria:** se realiza en tanques sedimentadores con fondo cónico separando el agua tratada de los sólidos sedimentables, generando lodos que son redireccionados otro proceso.

Al finalizar el proceso, el agua cuenta con una reducción de 40% de DBO5 y 60% de Sólidos en Suspensión Totales (SST) y es vertida al Río Bogotá. (DAMA, 2005; EAB, 2013).

Como se mencionó anteriormente, el primer subproducto obtenido es el lodo (164.935 m³/mes aprox.). Entonces, es sometido a un proceso de espesamiento por 24 horas en tanques de fondo cónico, por lo cual ocurre una segunda sedimentación. Posteriormente pasa a digestión anaerobia por 22 días a 35 °C y deshidratado. El producto final según el Decreto 1284 de 2014 puede ser considerado como biosólido tipo B. En promedio se generan 3734,64 ton/mes, sin embargo, varía a lo largo del año de acuerdo con la cantidad de agua residual tratada como se muestra en la Figura 5 (EAB, 2013; Empresa de Acueducto Alcantarillado y Aseo de Bogotá, 2017; Fierro, 2014).

Figura 5.
Producción mensual de biosólidos del periodo 2012 – 2017 PTAR Salitre.



Fuente: Elaboración propia a partir de EAB (2013).

El promedio mensual de la producción de biosólidos en los últimos seis años se encuentra entre 3400 y 4024 ton

y varía según la época del año. Se podría afirmar (obviando los acontecimientos climáticos específicos de cada año), que existe una relación entre la cantidad de lluvia y la producción. Durante el periodo de marzo a mayo y septiembre a noviembre (temporada de lluvia) la producción varía considerablemente; esto, puede presentarse por el incremento en el ingreso de aguas residuales por lluvias que sobrepasan la eficiencia de la planta y con ello afecta la eficiencia de la planta. Al contrario, de junio a agosto y diciembre a febrero (temporada seca) se tienen producciones similares con menor variabilidad de septiembre a noviembre.

Debido a su alta concentración de nitratos y fosfatos y baja en metales pesados, pueden ser considerados como materia prima para la producción de abonos, de ahí que sean usados en suelo, en la Tabla 2 se presentan algunas aproximaciones (EAB, 2013). En principio, los biosólidos generados en la PTAR Salitre eran transportados al RSDJ, acopiados, secados, mezclados en proporción 1:1 con suelo y dispuestos en las capas de revegetación según lo regulado por la Resolución 362 de 2001 y 0400 de 2002, durante siete años se dispusieron 345 000 toneladas de biosólido. (Empresa de Acueducto Alcantarillado y Aseo de Bogotá, 2004).

Tabla 2.
Composición biosólidos PTAR Salitre.

Parámetro	Metales pesados (mg/Kg)			
		Autor ¹	Autor ²	
(Humedad (%))	67	Arsénico	0,4	3,2
Sequedad (%)	33	Cadmio	4,7	6,8
pH	6,7	Cobre	140	157
N total promedio (mg/Kg)	29	Cromo	60	101,1
P total promedio (mg/Kg)	9,2	Mercurio	1,4	3,15
		Níquel	36,1	45,9
		Plomo	114	98,4

(Rodríguez, 2016)¹ (Araque, 2006)²

Fuente: Elaboración propia a partir de Araque (2006), Rodríguez (2016), y Vélez (2007).

A partir de julio de 2007 y a la fecha, se dio inicio a la disposición en el predio el Corzo, propiedad de Acueducto mediante la Resolución 3292 de diciembre de 2006 expedida por la CAR. Este proceso se lleva a cabo de forma progresiva en las 40,2 ha, es decir, en etapas, cubriendo 26 ha, 8,5 ha y finalmente 6,0 ha.,

luego de ser comedido a secado por 28 días, con volteo en el día 14 y posterior mezcla con suelo en proporciones 1:1. (Empresa de acueducto alcantarillado y aseo de Bogotá, 2004).

La razón principal por la cual el biosólido de la PTAR Salitre es dispuesto en suelo y no usado en otras actividades, corresponde a su clasificación como Tipo B de acuerdo con el Decreto 1287 y la Norma EPA 40 CFR 503. Esto limita su aplicación, en especial en el sector agrícola. (Araque M, 2006; Chávez Porras & Rodríguez González, 2011; EAB, 2013; Rodríguez Pérez, 2016).

Algunos de los trabajos llevados a cabo con biosólidos provenientes de la PTAR Salitre involucran su aplicación en escombreras, donde Rodríguez Pérez (2016) afirma se presenta incremento de macro y micro nutrientes. En canteras, como lo desarrollaron Ochoa Carreño & Barrera Cataño (2007) y Agudelo Valencia (2010), quienes hallaron un efecto positivo en la aplicación de biosólidos, ya que permitió el desarrollo de especies vegetales, presentando efectos diversos, de acuerdo a la proporción usada en cuanto a la cobertura y altura de las plantas.

A pesar de lo anterior, cuando se hace uso de los biosólidos directamente sobre las semillas, se tiene un efecto negativo sobre la germinación y el desarrollo de la plántula como lo reportan Ramírez Pisco & Pérez Arenas (2006). Por esta razón se han desarrollado tratamientos complementarios sostenibles como el vermicompostaje con el fin de mejorar la composición del biosólidos. De acuerdo con Chávez Porras & Rodríguez González (2011) y Albornoz Pineda & Ortega Valencia (2017), este proceso mejora la disponibilidad de nutrientes, disminuye la proporción tanto de metales pesados así como de microorganismos nocivos, ampliando su espectro de uso ya que puede alcanzar los niveles de biosólido tipo A.

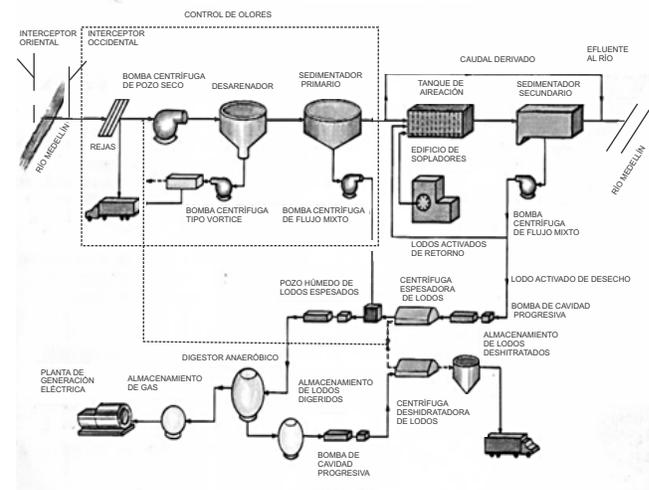
Medellín: planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando (Itagüí)

La planta de San Fernando se llevó a cabo desde 1996 a 1999, entró en funcionamiento en el año 2000 como la primera planta de tipo secundario en el país. Su desarrollo se presentó como parte del plan de descontaminación del río Medellín, que en asocio con otras tres plantas (Bello, Girardota y Barbosa) permitirán disminuir los vertimientos de agua residual y

su contaminación. Se encuentra en Itagüí, si bien cubre el sur de la ciudad y los municipios de Itagüí, Envigado, Sabaneta y La Estrella, para 2012 solo trataba entre el 20% – 25% de las aguas residuales producidas (193.987 m³) (Cataño, 2014; EPM, 2015).

La fase inicial de la planta atiende un caudal promedio de 1,8 m³/s y máximo de 3,6 m³/s al día. De acuerdo con su planificación, las fases de ampliación permitirán tratar hasta 4,8 m³/s. Hasta la fecha, alcanza un porcentaje de remoción de 80% tanto en SST así como en DBO5, con los siguientes procesos (Figura 6) (EPM, 2015):

Figura 6.
Esquema de funcionamiento PTAR San Fernando.



Fuente: Epm (1995).

- ✓ **Cribado:** permite retirar los residuos sólidos mediante rejillas con espacios de 18mm, inclinación de 7° y profundidad de 10m. Una vez colectados, son dirigidos a disposición en relleno sanitario.
- ✓ **Sistema de bombeo:** consta de un sistema de bombeo para la elevación del agua, que permiten elevarla una vez filtrada a los desarenadores para seguir el proceso por gravedad. Se puede elevar a 6m o 14m, cuenta con capacidad de 2,4 m³/s y de 1,2 m³/s, tanto el nivel de elevación como la capacidad usada dependerán del caudal de la planta.
- ✓ **Desarenadores:** permiten retirar arenas que ingresan con el agua y pueden desgastar los equipos de la planta. Esto, con el uso de desarenadores tipo vórtice de forma circular.
- ✓ **Tratamiento primario:** involucra un proceso de

sedimentación primaria cubierta para evitar olores; aquí se remueven grasas, aceites y otros (natas) se encuentran en la superficie, mientras los sedimentos pesados se concentran en una tolva central mediante precipitación. En este proceso se logra la remoción de 60% de SST y 30% de DBO5.

- ✓ *Tratamiento secundario:* consta de un reactor biológico de lodos activados. Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de tanques que funcionan como reactores biológicos (con capacidad total de 17.856 m³), donde se retiene el agua por 5h para que el proceso se lleve a cabo. La presencia de microorganismos en los reactores (biomasa) permite que usen la materia orgánica del agua en tratamiento como fuente de energía, disminuyendo los niveles de DBO5. Por ser un proceso aerobio, se tienen diversos puntos de aireación a lo largo del tanque mediante difusores de burbuja fina (550m³/min).
- ✓ *Sedimentación final:* también conocido como sedimentación secundaria. En él, se precipitan los sólidos aún presentes en el agua obteniendo lodo. Una parte de estos es recirculada para mantener la biomasa del sistema de lodos activados y la otra, pasa a un sistema de tratamiento de lodos.

Luego de la sedimentación final, el agua tratada pasa a ser vertida en el río Medellín con un nivel de oxígeno de 4 o 5 mg/L en promedio.

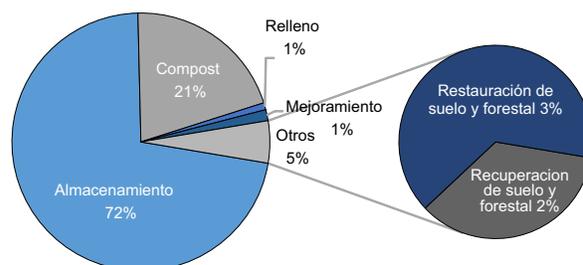
Los lodos de la PTAR San Fernando pasan por una fase de espesamiento mediante centrífugas que concentran el contenido de sólidos de 0,5% a 5%. Seguido por una digestión anaerobia, donde se mezclan con los lodos primarios para estabilizarlos (disminuir contenido orgánico y patógeno) produciendo biogás; este último, es usado para cubrir parte de las necesidades energéticas de la planta. Finalmente son deshidratados mediante centrífugas como en la deshidratación. Debido a la composición y características después del proceso, permiten que pueda ser reusado o reciclado, por lo cual puede ser denominado como biosólido.

En principio, se tenía estimada una producción de biosólidos de 44 ton/ día correspondiente a 160 m³, a ser dispuestos en rellenos sanitarios. No obstante, se pueden generar aproximadamente 90 ton/día, para un promedio anual de 27.787 ton húmedas. (Bedoya Urrego, Acevedo Ruíz, Peláez Jaramillo, y Agudelo López, 2013; Epm, 1995).

A partir del Decreto 1287 la Empresa Pública de Medellín (EPM) comenzó la búsqueda de alternativas para el manejo de biosólidos teniendo en cuenta su clasificación como tipo B. En mayor proporción son destinados al almacenamiento (72%), compost (20,47%), disposición final en rellenos (0,84%), mejoramiento (1,38%), recuperación de suelos y forestal (1,87%), restauración de suelos y forestal (3,42) como se ve en la Figura 7. (Contraloría General de Medellín, 2015).

Considerando la composición de los biosólidos como se puede observar en la Tabla 3, se han desarrollado avances de su uso en suelo. Dentro de estos ejemplos se encuentra la recuperación de taludes llevada a cabo por López Sánchez, Acevedo Cifuentes, & Ordóñez Ante (2010), quienes observaron un efecto favorable sobre el

Figura 7.
Gestión de biosólidos.



Fuente: Elaboración propia a partir de Contraloría General de Medellín (2015).

Tabla 3.
Composición biosólidos PTAR San Fernando.

Parámetro	Metales pesados			
			Autor ¹ (mg/Kg)	Autor ² (ppm)
(Humedad (%))	68	Arsénico	<0,01	-
Sequedad (%)	32	Cadmio	<0,01	1,68
pH	7,2	Cobre	271.50	-
N total promedio (%)	2,8	Cromo	2613,67	635,32
P total promedio (%)	2,1	Mercurio	< 1,76	-
		Níquel	86,73	178,92
		Plomo	170,95	45

Fuente: Elaboración propia a partir de Bedoya et al. (2013)¹, Quinchía & Carmona (2004)², y Vélez (2007).

desarrollo vegetal cuando este mezcla en partes iguales con limo. Algo semejante reporta Quinchía & Carmona (2004) con la aplicación de biosólidos en diferentes proporciones en un área con bajo contenido de materia orgánica, para este caso, se obtuvo mejores resultados cuando se usó 20 % y 30% de biosólidos con suelo, además, cuando es sometido a un proceso de compostaje que mejora su calidad, aunque no lo suficiente para ser usado en cultivos.

Al igual que los biosólidos de la PTAR Salitre, han sido usados en análisis de aplicación en suelos y no representan una amenaza para la contaminación de mercurio como lo reporta Ortiz Villa, Araque Marín, & Peláez Jaramillo (2016) pues los niveles registrados cumplen tanto las normas nacionales como internacionales. Además al igual que lo afirmado por Pinilla, Córdoba, Fuentes, & Montoya (2015) y López Sánchez, Acevedo Cifuentes, & Ordóñez Ante (2010) los pastos presentaron mejores características con la aplicación de biosólidos. En general, se siguen implementando diversas alternativas para el manejo y aprovechamiento de biosólidos, con el fin de disminuir el impacto que estos generan sobre el medio ambiente cuando son dispuestos de forma inadecuada.

Conclusiones

Los sistemas de saneamiento, especialmente el servicio de alcantarillado no coincide con el desarrollo de STAR, esto evita que se generen procesos eficientes y efectivos en el manejo de aguas residuales, de ahí que no sean sostenibles y causen contaminación, así como pasivos ambientales a largo plazo. Asimismo, teniendo en cuenta la realidad, los inconvenientes a nivel político afectan y limitan el progreso de este sector y a su vez a la población, en especial aquellos con menos recursos.

El manejo de las aguas residuales en ciudades como Bogotá y Medellín deberían permitir tratar más de la mitad de la producción total, como lo muestran otros estudios municipales sobre el tratamiento de aguas residuales (Gerba & Pepper, 2009, 2019). No obstante, generalmente se hace énfasis en la ampliación de cobertura de los servicios tanto de agua potable como de alcantarillado. Mientras los STAR no se actualizan al mismo tiempo para cubrir la nueva capacidad y llevar a cabo el saneamiento del agua residual producida. A pesar de esto, los procesos de ampliación y creación de STAR sigue presente, lo cual permite pensar que en

algún momento podrían mejorarse esta situación.

Por otra parte, el manejo de biosólidos en la PTAR Salitre y San Fernando muestran acercamientos a la creación de procesos sostenibles al plantear procesos de aprovechamiento a este residuo con el fin de reincorporarlo a la cadena productiva. Cabe resaltar que estas medidas buscan usar el mínimo de recursos, ya que cualquier tratamiento adicional o forma de aprovechamiento tecnificada implicará la ejecución de obras y presupuesto adicional.

En general, las alternativas de gestión de biosólidos en estas ciudades dan una imagen clara de su estado en Colombia, pues son las que llevan más tiempo lidiando con esta situación y analizando las diversas opciones que se pueden presentar.

En este sentido, otros modelos a nivel mundial pueden servir de guía en términos de infraestructura y eficiencia, como es el caso de Jordania, en donde el 85% de la población recibe proceso de tratamiento con 16 plantas que procesan 300 mil metros cúbicos de lodo líquido y 15 mil metros cúbicos de lodo deshidratado por año (Suleiman *et al.*, 2010), o como lo muestran Jodar-Abellan, López-Ortiz & Melgarejo-Moreno (2019) para España, que acogió la normatividad de la Unión Europea desde 1986 y hace reutilización de las aguas tratadas, que están en volumen entre los 268 y los 493 hectómetros cúbicos por año, con lo que propende por maximizar los recursos ambientales.

Referencias bibliográficas

- Agudelo V, M. (2010). Evaluación del estado actual de la vegetación en parcelas enmendadas con biosólidos en la antigua arenera Juan Rey, Bogotá D.C. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana.
- Albornoz P, A. M., & Ortega Valencia, E. M. (2017). Evaluación de la eficiencia de la lombriz roja californiana *E. foetida* para estabilización de lodos residuales de la PTAR Salitre. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11634/2864>
- Andreoli, C. V., & Von, M. (2007). Sludge treatment and disposal. *Environmental Protection*, 23. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-705-4.00021-6>
- Araque M, M. del P. (2006). Evaluación de los tratamientos

- termicos y alcalino en la desinfección del lodo generado en la Ptar el Salitre, 27.
- Bedoya U, K., Acevedo R, J. M., Peláez J, C. A., & Agudelo L, S. del P. (2013). Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia). *Revista de Salud Pública*, 15(5), 778–790.
- Cataño, L. A. (2014). En 75 % aumentará el tratamiento de aguas residuales. *El Mundo*. Disponible en: <http://www.elmundo.com/portal/pagina.general.impresion.php?idx=230122>
- Chávez P, Á., & Rodríguez G, A. (2011). Análisis químico y biológico de biosólidos sometidos a sistema de lombriculturacomopotencial abono orgánico. *Nova*, 9(15), 50–56.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (2005). CONPES 91 “Metas Y Estrategias De Colombia Para El Logro De Los Objetivos De Desarrollo Del Milenio - 2015.” Documento Conpes Social, 70.
- Contraloría General de Medellín (2015). Auditoría. Manejo biosólidos PTAR San Fernando. Medellín.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2012). Río Bogotá. Adecuación Hidráulica y Recuperación Ambiental, 2, 250. Disponible en: http://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/6/40506/2b_CAR_sf2010v2_E22180v20Box3414790Spanish.pdf
- Cortés, E., & Sánchez, J. A. (2014). 4 años para salvar el agua de Bogotá. Disponible en: http://www.eltiempo.com/Multimedia/especiales/salvar_agua_bogota/
- DAMA (2005). Tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Bogotá. Bogotá. Disponible en: https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/6/40506/DAM_A_sf2005_Tratamiento_rio_Bogota.pdf
- DANE (1941). Censo General. Bogotá.
- DANE (1993). Censo población 1993. Bogotá.
- DNP (2014). Evolución de las coberturas de los servicios de acueducto y alcantarillado (1985 -2013). Bogotá.
- Díaz Ortíz, A., & Bernal Payares, O. (2017). Caracterización del estado de responsabilidad social empresarial en los hoteles cinco estrellas de la ciudad de Cartagena - Caso hotel Holiday Inn Morros Cartagena. *Conocimiento Global*, 2(1), 56 - 63. Recuperado a partir de <http://conocimientoglobal.org/revista/index.php/cglobal/article/view/16>
- Domínguez, C., & Uribe, E. (2005). Evolution of the water supply and sewerage services during the last decade. Economic Development Study Center, Andes University, Colombia, 7191.
- EAB (2013). Acueducto, agua alcantarillado y aseo de Bogotá. Disponible en: http://www.acueducto.com.co/wps/v61/wps/portal!/ut/p/c5/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3gLw2DfYHMPIwN_cyMXA09HV1cLM2MTJ5MgE6B8pFm8s7ujh4m5j4GBv1GYgYGRn2lwoEFosLGBpzEB3eEg_DrB8kb4ACOBvp-Hvm5qfoFuREGWSaOigAIs6kp/dl3/d3/L3dDb0EvUU5RTGtBISEvWUZSdndBISEvNI84MVNN
- El tiempo (2017, March 22). Siete de cada diez municipios no tratan sus aguas residuales. Periódico El Tiempo. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/tratamiento-de-aguas-residuales-en-colombia-69962>
- Empresa de Acueducto Alcantarillado y Aseo de Bogotá (2004). Informe mensual. Disponible en: <http://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/A2004/IAJULIO2004.pdf>
- Empresa de Acueducto Alcantarillado y Aseo de Bogotá (2017). Informe mensual de actividades. Disponible en: http://www.acueducto.com.co/wps/v61/wps/portal!/ut/p/c5/hY7LD o I w E E W _ h S - Y o f Q B S 1 Q E E q B q o 1 I 2 p D E E M T x c G B P - X o g b N 8 j M 8 t x 7 Z q C A a X v z b m r z a o b e t J B D w U v X V q k S E U E p y A 5 j P w h c 7 t A N P d G J a 1 5 u Q z - i l k G U 5 I J I M q a O e F Y O x s 5 K - z r f - 0 m E b O 9 h L J m X y D S 0 E d m X _ P P H b f G R 8 i i o a v g v G L R H u Q c N B R i 8 V t h g 2 6 r 2 t x G e H Y 5
- EPM (1995). Tratamiento de aguas residuales planta San Fernando. Medellín: EPM. Disponible en: http://www.grupo-epm.com/Portals/1/plegables/Aguas/p247_Tratamiento_de_aguas_residuales_planta_San_Fernando_tratamiento_de_aguas_residuales.pdf
- EPM (2015). Descripción del proyecto planta de tratamiento de aguas residuales Bello. Medellín, Colombia.
- Evans, T. D. (2012). Biosolids in Europe. Water Environment Federation, 10.
- Fierro, J. P. (2014). Alpina. Informe de sostenibilidad 2014, 1 - 43. Disponible en: https://www.alpina.com.co/sites/default/files/Informe_Sost

- enibilidad 2014.pdf
- Gerba, C., & Pepper, L. (2009). Wastewater treatment and biosolids reuse. *Environmental Microbiology (Second Edition)*, 503-530. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370519-8.00024-9>
- Gerba, C.P., & Pepper, I.L. (2019). Municipal wastewater treatment. In: *Environmental and Pollution Science (Third Edition)*, 22, 393-418. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00022-7>
- Hernández Royett, J., Franco, D., Canabal Guzmán, J., Sánchez Otero, M., & D'Andreis Zapata, A. (2017). La auditoría ambiental, una atribución de las funciones del revisor fiscal. *Aglala*, 8(1), 219-242. Recuperado de <http://revistas.curnvirtual.edu.co/index.php/aglala/article/view/1033>
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). A global review of solid waste management. *World Bank Urban Development Series Knowledge Papers*, 1-116. Retrieved from: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>
- ICONTEC (2011). Norma técnica colombiana 5167. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. (ICONTEC, Ed.) (2nd ed.). Bogotá. Disponible en: http://www.sian.inia.gov.ve/repositorio/congresos/1compostaje_5normalizacion/BIBLIOGRAFIA/Bib_Norma_Tecnica_Colombiana.pdf
- Jodar-Abellan, A., López-Ortiz, M. I., & Melgarejo-Moreno, J. (2019). Wastewater treatment and water reuse in Spain. Current situation and perspectives. *Water*, 11(8), 1551. Doi: <https://doi.org/10.3390/w11081551>
- LeBlanc, R. J., Richard, R. P., & Beecher, N. (2009). A review of "Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource." *Proceedings of the Water Environment Federation*. Doi: <https://doi.org/10.2175/193864709793846402>
- López, M. M., Gutiérrez L, A., & Sastre A, H. (1996). Biosólidos generados en la depuración de agua (I): Planteamiento del problema. *Ingeniería del agua*, 3(1), 47-62. Doi: <https://doi.org/10.4995/ia.1996.2698>
- López S, I. J., Acevedo C, D. R., & Ordóñez A, C. (2010). Seguimiento a patógenos presentes en biosólido empleado como enmienda para revegalizar un talud. *Revista Ingenierías*, 9(17), 29-40.
- Mahamud, M., Gutiérrez, A., & Sastre, H. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas: (III). Métodos de tratamiento. *Ingeniería del agua*, 3(II), 45-54. Doi: <https://doi.org/10.4995/ia.1996.2703>
- Ministerio de Desarrollo Económico (2000). Resolución 1096 de 2000.
- Ministerio de Vivienda, C. Y. T. (2014). Decreto 1287 del 10 de julio de 2014. Bogotá. Disponible en: [http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documentos/JULIO/10/DECRETO 1287 DEL 10 DE JULIO DE 2014.pdf](http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documentos/JULIO/10/DECRETO%201287%20DEL%2010%20DE%20JULIO%20DE%202014.pdf)
- Ministerio de Vivienda, C. y T. de C. (2017). Colombia supera la meta en el tratamiento de aguas residuales en el país. Bogotá.
- Ochoa C, A. C., & Barrera C, J. I. (2007). Efecto de la aplicación de biosólidos, sobre el desarrollo de la vegetación en las primeras etapas sucesionales, en la cantera Soratama, localidad de Usaquén, Bogotá. *Universitas Scientiarum*, 12(2), 57-72.
- ONU (2003). La situación La crisis mundial del agua. ONU-W W A P, 36. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556s.pdf>
- Ortiz V, A. Y., Araque M, P., & Peláez J, C. A. (2016). Cuantificación de mercurio en pasto tratado con biosólidos por espectrofotometría de absorción atómica con generador de hidruros. *Revista EIA*, 13(24), 147-155.
- Osorio, J. (2008). La historia del agua en Bogotá: una exploración bibliográfica sobre la cuenca del río Tunjuelo en el siglo XX. *Memoria y Sociedad*, 12, 107-116.
- Pérez, S. S., Bonilla, J. P., Acevedo Arias, G. I., Rivera, M., & Muñoz, L. (2004). Plan nacional de manejo de aguas residuales en Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Disponible en: <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- Pinilla, M. C. C., Córdoba, L. K. M., Fuentes, N. P., & Montoya, G. I. G. (2015). Assessment of indicators of fecal contamination in soils treated with biosolids for growing grasses. *Universitas Scientiarum*, 20(2), 217-227. Doi: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC20-2.aifc>
- Potisek, C., Viramontes, U. F., & Ibarra, R. J. (2005). Agua, saneamiento, reutilización y aprovechamiento de biosólidos. *Retos de la investigación del agua en México*, 217-224.

- Quinchía, A. M., & Carmona, D. M. (2004). Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada. *Revista EIA*, (2), 89–108.
- Ramírez P, R., & Pérez A, M. I. (2006). Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Raphanus sativus* L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 59(2), 3543–3556.
- Roncancio, A. D., Camargo, D.A., & Muñoz, N.M. (2017). Consideraciones sobre un marco metodológico encaminado al análisis de textos. *Sophia*, 13 (1), 109-121.
- Rodríguez P, Y. (2016). Estudio preliminar de lotes con diferente historial de incorporación de biosólidos provenientes de la PTAR El Salitre en la escombrera El Corzo, Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/52900/>
- Sierra, H. (2017). Tratamiento de aguas en Colombia recomendaciones de fibras y normas. *Revista empresarial y laboral*, disponible en: <https://revistaempresarial.com/empresas/tratamiento-de-aguas-en-colombia-recomendaciones-de-fibras-y-normas/>
- Suleiman, W., Gerba, C. P., Tamimi, A. H., Freitas, R. J., Sheraideh, A. A., & Hayek, B. (2010). Management practices of sludge and biosolid treatment and disposal in Jordan. *Journal of Residuals Science and Technology*, 7(1), 63-67.
- Terreros, D. (2014). Gestión ambiental: una mirada desde la contabilidad. *Revista Activos* 23, 227-241
- Torres, E. (2004). Reutilización de aguas y lodos residuales, 11. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/lodos.pdf>
- UNESCO (2017). Aguas residuales. Vol. 30028. Disponible en: http://www.ecured.cu/index.php/Aguas_residuales
- UNICEF (2010). El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. La infancia, el agua y el saneamiento básico en los planes de desarrollo departamentales y municipales. Disponible en: <http://www.unicef.org.co/pdf/Agua3.pdf>
- United Nations (2017). Objetivos de Desarrollo del Milenio. Disponible en: <http://www.un.org/es/millenniumgoals/>
- Van D, T. (2005). Estructuras y funciones del discurso. México: Siglo XXI editores.
- Vélez Z, J. A. (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema? *Producción + Limpia*, 2, 57–71.
- Walker, J., Knight, L., & Stein, L. (1994). *A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule*, (September), 183.
- WSP, Mundial, B., Cosude, UNICEF, & BID. (2007). Saneamiento para el desarrollo ¿Cómo estamos en 21 países de América Latina y el Caribe? En: 1 (Ed.), *Latinosan. Conferencia Latinoamericana de Saneamiento*. (1st ed., p. 208). Perú: Ledel S.A.C.