

**ASPECTOS CLAVES PARA LA SELECCIÓN DE ESQUEMAS DESCENTRALIZADOS EN EL  
MANEJO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN COLOMBIA**

**JULIO CESAR CAICEDO VILLADA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE  
PROGRAMA DE INGENIERIA SANITARIA  
SANTIAGO DE CALI  
2014**

**ASPECTOS CLAVES PARA LA SELECCIÓN DE ESQUEMAS DESCENTRALIZADOS EN EL  
MANEJO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN COLOMBIA**

**JULIO CESAR CAICEDO VILLADA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Sanitario

Directora

**DIANA PAOLA BERNAL SUÁREZ**

Ingeniera Sanitaria

Universidad de Valle

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE  
PROGRAMA DE INGENIERIA SANITARIA  
SANTIAGO DE CALI  
2014**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, las gracias a Dios por la vida, salud y la capacidad de poder desarrollar este proyecto satisfactoriamente.

A mi familia y amigos que se preocuparon constantemente por el avance del proyecto y se ofrecieron a colaborar durante el proceso.

A mi coordinadora de tesis, la Ingeniera Diana Paola Bernal, por su inmenso soporte en este proceso y por las horas de dedicación que hicieron posible finalizar mi proyecto de grado.

A los expertos consultores, profesores, ingenieros y demás personas que amablemente diligenciaron la encuesta.

A los ingenieros Julio Aroca y Javier Polanco por sus consejos relacionados con la ejecución del proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
2	JUSTIFICACIÓN .....	2
3	ANTECEDENTES .....	5
4	MARCO CONCEPTUAL .....	8
4.1	TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS (TGS) .....	8
4.2	PRINCIPIOS DE BELLAGIO .....	8
4.3	GESTIÓN INTEGRADA DEL AGUA URBANA (GIAU) .....	9
4.4	SANEAMIENTO CENTRADO EN LA VIVIENDA .....	10
4.5	ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR AGUAS RESIDUALES .....	11
4.5.1	Producción más limpia (PmL).....	11
4.5.2	Uso eficiente del agua .....	12
4.5.3	Tratamiento del Agua Residual .....	13
4.6	SOSTENIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE MANEJO DE AGUA URBANA .....	14
4.7	SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA .....	16
5	OBJETIVOS .....	20
5.1	OBJETIVO GENERAL.....	20
5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
6	METODOLOGIA.....	21
6.1	REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y EXPERIENCIAS SOBRE DESCENTRALIZACIÓN...21	
6.2	IDENTIFICACIÓN DE INDICADORES CLAVES PARA LA DESCENTRALIZACIÓN EN EL MANEJO DEL AGUA RESIDUAL .....	21
6.3	DEFINICIÓN DE INDICADORES CLAVES PARA IMPLEMENTACIÓN DE ESQUEMAS DESCENTRALIZADOS EN COLOMBIA .....	21
7	RESULTADOS .....	25
7.1	REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y EXPERIENCIAS SOBRE DESCENTRALIZACIÓN...25	
7.1.1	Centralización vs descentralización en el manejo del agua residual municipal .....	25
7.1.2	Criterios de sostenibilidad en la descentralización del manejo del agua residual.....27	

7.1.3	Ventajas y desventajas de la descentralización del sistema de manejo del agua residual .....	28
7.1.4	Revisión de experiencias sobre descentralización en el manejo del agua residual.....	31
7.2	IDENTIFICACIÓN DE ASPECTOS CLAVES PARA LA DESCENTRALIZACIÓN EN EL MANEJO DEL AGUA RESIDUAL .....	36
7.3	ASPECTOS CLAVES PARA LA DESCENTRALIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN COLOMBIA .....	42
7.3.1	Definición de los aspectos.....	42
7.3.2	Estadística descriptiva.....	45
7.3.3	Resultados de aplicación de técnicas de Clasificación (Ranking) y Calificación (Rating) .....	48
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	57
8.1	CONCLUSIONES.....	57
8.2	RECOMENDACIONES .....	58
9	BIBLIOGRAFIA .....	59
	ANEXOS .....	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Tendencia de la investigación sobre descentralización .....	4
Figura 4.1. Gestión integrada de aguas urbanas.....	10
Figura 4.2. Enfoque del saneamiento centrado en la vivienda .....	11
Figura 4.3. Enfoque Estratégico de los 3 Pasos .....	12
Figura 4.4. Eficiencias de remoción por nivel de tratamiento .....	13
Figura 4.5. Sistema sostenible de gestión del agua urbana .....	15
Figura 4.6. Etapas de la implementación de un sistema de tratamiento de agua residual .....	16
Figura 4.7. Características de la tecnología más apropiada .....	19
Figura 7.1. Niveles de tratamiento de la descentralización.....	26
Figura 7.2. Grupos de expertos participantes en la encuesta de priorización de indicadores de descentralización.....	42
Figura 7.3. Pesos relativos de aspecto económico e institucional .....	51
Figura 7.4. Pesos relativos de aspecto tecnológico.....	53
Figura 7.5. Pesos relativos de aspecto social.....	54
Figura 7.6. Pesos relativos de aspecto ambiental .....	55

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Experiencias sobre descentralización.....	6
Tabla 4.1. Niveles de tratamiento .....	14
Tabla 4.2. Factores a considerar en el proceso de selección para el manejo sostenible .....	17
Tabla 7.1. Comparación entre esquemas centralizado y descentralizado .....	27
Tabla 7.2. Criterios de sostenibilidad para la descentralización del manejo del agua residual.....	28
Tabla 7.3. Indicadores para comparación de tecnologías descentralizadas de manejo del agua residual.....	28
Tabla 7.4. Análisis de fuerzas para la implementación de esquemas descentralizados.....	30
Tabla 7.5. Experiencias sobre descentralización.....	31
Tabla 7.6. Indicadores identificados en la revisión del estado del arte sobre esquemas de tratamiento descentralizados.....	37
Tabla 7.7. Definición y alcance de indicadores de descentralización identificados en la revisión del estado del arte.....	39
Tabla 7.8. Participantes de la encuesta de priorización de indicadores de descentralización .....	43
Tabla 7.9. Presentación y definición de variables e indicadores de la encuesta sobre descentralización.....	43
Tabla 7.10. Porcentaje, Desviación estándar, moda, máximos y mínimos para técnica de Clasificación (Ranking) .....	46

Tabla 7.11. Porcentaje, Desviación estándar, moda, máximos y mínimos para técnica de Calificación (Rating).....	47
Tabla 7.12. Pesos relativos combinados .....	49
Tabla 7.13. Orden de prioridad de indicadores analizados para descentralización .....	55

## RESUMEN

Las coberturas en el manejo del agua residual urbana en Colombia no son las adecuadas a pesar de la voluntad por mantener una alta cobertura en alcantarillado. Parte de los esfuerzos en el campo del manejo del agua residual se ven direccionados a la implementación de esquemas centralizados que han demostrado no ser la solución efectiva en algunos casos teniendo en cuenta la problemática de la contaminación hídrica del país, pues de los 75.95 m<sup>3</sup>/s de agua residual municipal que se produjeron en el país en el año 2010, se trataron 18.93 m<sup>3</sup>/s (24.92%). Se ha observado que una estrategia para mejorar la gestión del recurso hídrico en zonas urbanas es la implementación de esquemas descentralizados para el manejo del agua residual debido a los beneficios que han evidenciado estos sistemas en tema de coberturas de tratamiento, disminuyendo costos de inversión inicial y reduciendo el impacto ambiental en las fuentes de agua.

En este trabajo, se revisan el estado del arte y las experiencias relacionadas con la implementación de esquemas descentralizados a nivel global y local, con el objetivo de identificar los aspectos claves de selección de sistemas de tratamiento descentralizados desde los puntos de vista económico, institucional, tecnológico, social y ambiental. Una vez identificados los aspectos, se emplea una metodología de análisis multicriterio conocida como Clasificación/Calificación (Ranking/Rating) para priorizar los indicadores identificados previamente para implementación de esquemas descentralizados. Esta priorización se realizó a través de una encuesta a expertos de diferentes sectores relacionados con el manejo del agua residual.

Mediante este análisis, se concluye que los indicadores relevantes dentro de los aspectos económico e institucional, tecnológico, social y ambiental para la descentralización del agua residual en Colombia son “inversión en el sistema de tratamiento”, “apoyo institucional para esquemas descentralizados”, “nivel de descentralización”, “disponibilidad de área”, “reuso urbanístico (riego de parques y zonas verdes, lavado de calles”, “participación de la comunidad en administración, O&M del sistema”, “tamaño de población” y “producción de olor, ruido, insectos y afectación paisajística”.



# 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Aunque la cobertura de alcantarillado urbano en Colombia ha incrementado desde el año 1993 a 2008, aumentando de 81.8% a 92.9%, y de acuerdo con las metas del milenio se espera alcanzar una cobertura de 97.6% al año 2015 (DNP, 2010), no se ha evidenciado el mismo comportamiento con respecto a las coberturas de tratamiento y eficiencias de remoción en la mayoría de las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) del país.

Según MAVDT (2010b) se observa que de los 75.95 m<sup>3</sup>/s de agua residual municipal que se produjeron en el país en el año 2010, se trataron 18.93 m<sup>3</sup>/s (24.92%). Adicionalmente, es conveniente indicar que solamente, correspondiente al 24.92% de las PTAR construidas y en funcionamiento cumplen con las eficiencias requeridas según la normatividad colombiana (MAVDT, 2006); para Collazos (2008a) se alcanzan niveles de tratamiento primario con eficiencias del 30-50% para la mayor parte de las PTAR construidas en el país; se estima que solo un 10% de estos sistemas tienen un adecuado funcionamiento (MAVDT y DNP, 2004). En Colombia, las PTAR implementadas con enfoque centralizado no brindan niveles de tratamiento que garanticen la preservación en la calidad del recurso hídrico y el medio ambiente, y en algunas ocasiones se presentan porcentajes elevados del agua residual captada por el alcantarillado urbano que no se conduce a las plantas, sino que se vierten directamente a los cuerpos receptores, creando un riesgo latente para la salud e impactando la calidad de los cuerpos hídricos y el medio ambiente.

La escasez del recurso hídrico y la falta de cobertura en el manejo del agua residual sugieren un nuevo enfoque que permita alcanzar un manejo sostenible del agua, empleando infraestructura para el tratamiento de calidad, que promuevan el reuso del agua residual lo más cerca posible del punto de generación y que reduzcan la demanda de agua potable.

En este sentido, una de las estrategias para mejorar la gestión del recurso hídrico en zonas urbanas de Colombia son los sistemas descentralizados para el manejo del agua residual, que aumentan las coberturas de tratamiento de agua residual y promueven el reuso del agua residual tratada. Como un primer paso para planificar la implementación de esquemas de tratamiento descentralizados, es necesario realizar la identificación de los aspectos claves de tipo tecnológico, social, ambiental y económico de acuerdo al contexto de las zonas urbana de Colombia.

**Pregunta de la investigación:** ¿Cuáles son los aspectos que deben tenerse en cuenta para la selección de esquemas descentralizados para el manejo del agua residual municipal en zonas urbanas de Colombia?

## 2 JUSTIFICACIÓN

La sostenibilidad de los sistemas de manejo del agua residual centralizados puede verse afectada en zonas urbanas con bajos recursos económicos, altas tasas de crecimiento demográfico e insuficiente voluntad institucional y gubernamental para buscar estrategias que solucionen de forma integral el problema del agua residual. El impacto global que generan estos sistemas en condiciones como las planteadas puede ser minimizado mediante esquemas descentralizados para el manejo del agua residual; se han evidenciado beneficios en el aspecto económico, al minimizar costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de estos sistemas; en el aspecto social, promoviendo en las personas una cultura orientada al reuso del agua residual y apropiación de los sistemas, y en el aspecto ambiental, minimizando el impacto de los vertimientos en los cuerpos receptores y contribuyendo a la preservación en la calidad de vida de la gente y el medio ambiente.

En esquemas descentralizados se emplean tecnologías que responden en casi cualquier entorno, desde zonas suburbanas hasta centros rurales, industriales, comerciales y áreas residenciales (Brown *et al.*, 2010; Ho y Anda, 2006; Lamichhane, 2007; Tchobanoglous *et al.*, 2003; Tchobanoglous *et al.*, 2004; Weber *et al.*, 2007; Wilderer y Schreff, 2000).

En cuanto a calidad de agua, los sistemas descentralizados son más eficientes removiendo microcontaminantes que los sistemas centralizados (Libralato *et al.*, 2012). Son sistemas que tienden a detener el detrimento en la calidad de las aguas superficiales, pues promueven la recuperación y recirculación del agua tratada (Ho y Anda, 2006; Hong *et al.*, 2005; Ronteltap *et al.*, 2007; Weber *et al.*, 2007). Además, es posible tener una separación de contaminantes en la fuente, facilitando su tratamiento y potencial reuso, así como el incremento en la eficiencia de tratamiento y el ahorro de energía (Borsuk *et al.*, 2008; Brown *et al.*, 2010; Rauch *et al.*, 2003; Tchobanoglous *et al.*, 2003; Tchobanoglous *et al.*, 2004).

En comparación con los sistemas centralizados, el mayor costo de la descentralización está relacionado con la unidad de tratamiento (Hong *et al.*, 2005), estos sistemas pueden trabajar tanto de forma independiente como de forma conjunta con esquemas centralizados, conectándolos al sistema de recolección existente de la planta centralizada, con la ventaja de que la carga contaminante habrá sido reducida en el lugar de generación, que se traduce en menores costos de operación y mantenimiento del tratamiento centralizado.

La capacidad de autodepuración de ríos, lagos y mares va disminuyendo a medida que la contaminación por vertimientos de aguas residuales se hace frecuente en fuentes superficiales y subterráneas (Orozco, 2005). Adicionalmente, la escasez de agua dulce debido al crecimiento demográfico, la urbanización y el cambio climático han hecho aún más crítica la situación. A finales

de 2011, la cantidad de habitantes en el mundo fue de 7,000 millones, incrementando en más del doble la cantidad registrada en la década de 1960 (3,000 millones). Considerando que a la humanidad le tomó 18 siglos en alcanzar los 1,000 millones de habitantes, se evidencia un incremento vertiginoso en la población mundial que plantea complejos desafíos para el sector del agua y saneamiento (URL-1).

Se estima que la población urbana mundial pasará de los 3,170 millones de personas que se registraban en 2005 a 4,970 millones en 2030; del aumento previsto de 1,800 millones sólo 116 millones serán habitantes de los países de ingresos elevados. La población de las zonas urbanas crece actualmente a un ritmo de casi 1.3 millones de personas a la semana, es decir, el equivalente a una ciudad del tamaño de Munich u Orlando (UNICEF, 2009).

En consecuencia al vertiginoso crecimiento poblacional que experimenta el mundo, el consumo de agua mundial se ha triplicado desde 1950 hasta el año 2006 sobrepasando 4,300 km<sup>3</sup> al año, cifra equivalente al 30% de la dotación mundial de agua renovable. En el siglo XX, el consumo global de agua aumentó seis veces entre 1900 y 1995, más del doble de la tasa de crecimiento población. Las captaciones de agua para el riego se han incrementado un 75% desde 1960 (INE, 2008).

Esta condición agrava la situación del manejo del agua residual en las zonas urbanas, sobre todo en países en desarrollo, debido en parte a la falta de compromiso y voluntad gubernamental e institucional por hacer frente al problema. De acuerdo con estimativos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Consejo Colaborativo para el Suministro de Agua y el Saneamiento (WSSCC), el 25% de la población urbana de los países en desarrollo carecen de acceso a los servicios de saneamiento que ha conllevado a numerosas enfermedades (OMS, 2002).

En la actualidad, según Libralato *et al.* (2012) los sistemas centralizados para el manejo del agua residual urbana son la constante en el mundo desarrollado, y en los países en vía de desarrollo. Sin embargo, las experiencias demuestran que estos sistemas pueden generar en ocasiones inconvenientes económicos, sociales y ambientales. Los esquemas centralizados representan grandes inversiones, debido a los costos de capital inicial, así como los costos en la operación y mantenimiento, y la implementación de redes de alcantarillado que representan entre el 80 y 90% de los costos relacionados con el manejo del agua residual para ciertos autores (Bakir, 2001; Libralato *et al.*, 2012; Maurer *et al.*, 2005; Otis, 1996), entre el 60 y 70% para Massoud *et al.* (2009), y según Hoover (URL-2) estos costos representan alrededor del 60% de la inversión total de estos sistemas.

Así como las ciudades no detienen su crecimiento, muchos sistemas centralizados se han visto sobrecargados. Ello implica una expansión de la planta de tratamiento, lo que representa en algunos casos un problema debido a que no se ha tenido en cuenta este aspecto en la fase de planeación y la planta que alguna vez estuvo en un área remota, se encuentra rodeada por edificaciones.

Además, se requiere una adecuación del sistema de recolección que generaría interrupciones en el tráfico y otras actividades públicas.

Una justificación importante para la implementación de enfoques descentralizados es el estado de contaminación de los cuerpos hídricos receptores de vertimientos en Colombia, que pese a ser el sexto país con mayor oferta hídrica en el mundo, el Ministerio de Medio Ambiente calcula que la mitad de los recursos hídricos tienen problemas de calidad. Se estima que el sector industrial, agropecuario y doméstico en Colombia generan diariamente 9 mil toneladas de materia orgánica contaminante de los acuíferos, lo que muestra que a pesar de las grandes inversiones en sistemas de tratamiento centralizados no se ha podido controlar esta contaminación (URL-3).

De igual forma, la tendencia a la descentralización de los sistemas de manejo es global y va en aumento. La Figura 2.1 ilustra la cantidad de artículos científicos publicados por ScienceDirect (URL-4) sobre descentralización del manejo de aguas residuales municipales desde la década de 1990, hasta el año 2011, evidenciando un incremento en el interés investigativo sobre estos temas alrededor del mundo.

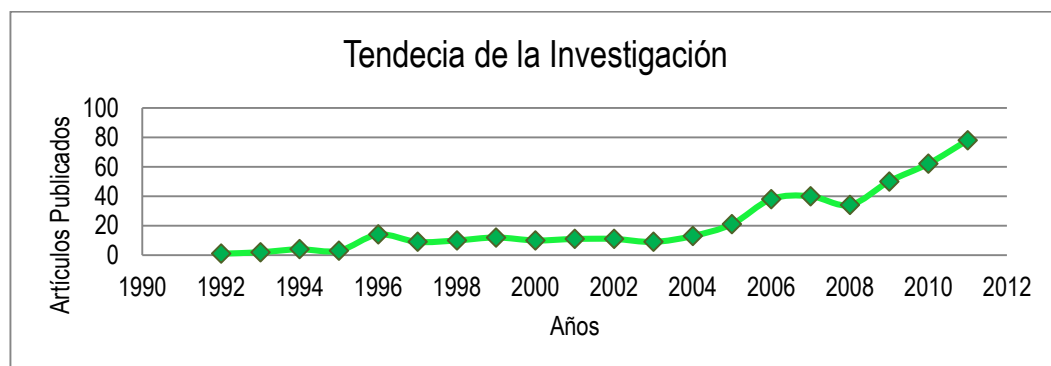


Figura 2.1. Tendencia de la investigación sobre descentralización  
Fuente: (URL-4)

Según lo analizado, gran parte de los estudios investigativos surgen a causa de una problemática económica, social y ambiental que se está presentando debido a la escasez del recurso hídrico en las urbes del mundo. Alrededor de la tercera parte de los artículos se refieren a estudios de caso en zonas de potencial aplicación de sistemas descentralizados, donde se evalúan diversas variables económicas, tecnológicas, sociales y ambientales.

A razón de la problemática en el manejo del agua residual, es pertinente buscar alternativas seguras y confiables de tratamiento que reduzcan el impacto en el ambiente y al mismo tiempo, resulten sostenibles desde los puntos de vista económico, social y ambiental. Se propone como estrategia los esquemas descentralizados para el manejo del agua residual urbana, para lo cual es necesario identificar los aspectos claves que potencializan su implementación.

### 3 ANTECEDENTES

Alrededor de 40% de la población mundial carece de un saneamiento básico y billones de personas no tienen acceso al agua potable. Según OMS (2002) se estima que cerca del 25% de la población urbana de los países en desarrollo no cuenta con un adecuado servicio de saneamiento, derivando en brotes de enfermedades que afectan la calidad de vida de las personas (CNES, 2003; Ho, 2004). Según la OMS, 2.1 millones de personas mueren anualmente por enfermedades diarreicas, y la incidencia de otras enfermedades como la ascariasis es de 900 millones de casos globalmente (OMS, 2002; Wright, 1997).

El manejo del agua residual de forma centralizada ha sido de gran importancia para la gestión urbana de los recursos hídricos en las sociedades modernas; sin embargo, estas instalaciones representan una de las mayores inversiones dado su alto costo de construcción, operación y mantenimiento. Adicionalmente, el acelerado crecimiento poblacional, la falta de cobertura del servicio, el insuficiente apoyo institucional y político, y la creciente demanda de agua para actividades urbanas y agrícolas hacen que el enfoque centralizado sea insostenible para las ciudades del futuro (Gikas y Tchobanoglous, 2009; Massoud *et al.*, 2009). La implementación de enfoques descentralizados para la gestión del agua resulta atractivo para el desarrollo urbanístico del futuro, al tratarse de instalaciones más simples, sostenibles y factibles económicamente, que permiten el reuso del agua tratada en actividades que no requieren de altos estándares de calidad.

Diferentes experiencias sobre la descentralización en el manejo del agua residual se encuentran alrededor del mundo. Casos como el de la urbanización The Rouse Hill Development Area (RHDA), Rouse Hill, New South Wales, Australia, donde se implementó un sistema de tuberías dual en las viviendas para la conservación de las fuentes hídricas. Este sistema separa el agua potable del agua residual, siendo esta última usada para aplicaciones domiciliarias que no requieren agua de alta calidad, como descargas del inodoro, lavado de autos y riego de jardín. Como resultado, los vertimientos de agua residual tratada en la fuente de abastecimiento del sector urbano se minimizaron, y la demanda de agua potable se redujo aproximadamente un 35% desde que el sistema entró en funcionamiento (Cooper, 2003).

Un 14% de la población en Grecia puede ser servida por sistemas descentralizados (Tsagarakis *et al.*, 2001). Turquía intenta evitar la implementación de esquemas centralizados debido al alto costo de construcción y operación partiendo del hecho que más del 28% de sus municipalidades están servidas por tanques sépticos (Engin y Demir, 2006). En Chipre se inició hace algunos años un programa de subsidios para las familias que optaran por instalar sistemas de reuso y reciclaje de aguas grises. En Columbia, Estados Unidos, los costos relacionados con una PTAR centralizada se han reducido a favor de 2 PTAR descentralizadas (Bakir, 2001).

Japón está a la vanguardia en los procesos de descentralización, donde Kimura *et al.* (2007) reportan la presencia de 2500 PTAR descentralizadas, dedicadas principalmente al tratamiento del agua residual y al reuso en grandes bloques comerciales y edificios residenciales. Se estima que las PTAR descentralizadas son instaladas en 26% de las oficinas públicas, 13% de los edificios privados y otro 15% en escuelas, hospitales y centros deportivos.

Venecia no tiene un sistema de recolección y tratamiento por sus características urbanísticas particulares al ser una ciudad ubicada en una laguna de profundidad aproximada de 0.5 m, pero tiene alrededor de 4,493 PTAR distribuidas en toda la ciudad. Su instalación, apoyada por la política y la legislación del país, ha reducido la carga de contaminación orgánica e inorgánica, mejorando la salud general y el estado ambiental de la laguna de Venecia (MAV, 2007).

En Colombia no existen registros que documentan el uso de esquemas descentralizados para el manejo del agua en zonas urbanas. Sin embargo, este tipo de sistemas han presentado problemas que han llevado a su cierre en algunos casos, como por ejemplo la PTAR el Vivero, operada por la empresa de servicios públicos de la ciudad de Cali (EMCALI), que contaba con una tecnología UASB. La incomodidad por olores en el entorno y en los sifones de los sectores residenciales próximos a la planta, junto con las deficiencias en la conducción de biogás, emisión de olores en el pozo de bombeo, las fugas en las campanas de gas y la acumulación de materia orgánica en los desarenadores llevaron a que la planta se sacara de servicio (Collazos, 2008b).

La Tabla 3.1 presenta otras experiencias de países, cuyas ciudades hoy día cuentan con sistemas descentralizados para el manejo del agua residual que operan eficiente y eficazmente.

Tabla 3.1. Experiencias sobre descentralización

Lugar	Aplicación
<i>Australia</i>	En Melbourne, el 90% de las descargas de aguas residuales son conducidas a dos PTAR centralizadas. Sin embargo, varias plantas de tratamiento satélite sirven a las áreas urbanas que, generalmente, están distantes del sistema centralizado (Brown <i>et al.</i> , 2010).
<i>Vietnam</i>	En Hanói, hay cerca de 10,000 tanques sépticos en operación para tratamiento del agua residual domésticas. En los centros urbanos el porcentaje de viviendas equipadas con tanques sépticos está alrededor del 50 – 80%. En las demás partes de la ciudad el porcentaje es del 20 – 30% (MC, 1998).
<i>E.U.A</i>	En California, las aguas residuales de una localidad de la ciudad de Upland son conducidas a una PTAR satélite con un sistema de tratamiento terciario de calidad con base en la norma del estado de California. El agua producida sirve como reserva para el riego de una cancha de golf de la ciudad, evitando así el uso de la limitada agua subterránea de la misma (Gikas y Tchobanoglous, 2009).
<i>Bolivia</i>	Existen dos PTAR semi-centralizadas en la ciudad de Cochabamba, Bolivia, cuyos efluentes se emplean para riego de zonas verdes urbanas y reforestación. A su vez, alivian la presión sobre la planta centralizada de Alba Rancho. Estas plantas sirven a 1,720 habitantes de la ciudad (AGUATUYA, 2011).

Tabla 3.1. Experiencias sobre descentralización (continuación)

Lugar	Aplicación
<i>Jordania</i>	Desde 2006 el proyecto de investigación “Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos Disponibles con Tecnologías Innovadoras” (SMART – por sus siglas en inglés) se ha centrado en financiar infraestructura e implementar sistemas sostenibles de operación y mantenimiento de esquemas descentralizados de tratamiento en zonas urbanas del Valle Rift de Baja Jordania (Van Afferden <i>et al.</i> , 2010).
<i>Indonesia</i>	La falta de un sistema de tratamiento de agua residual adecuado en la segunda ciudad más grande de Indonesia, Surabaya, a causa de los bajos ingresos de las áreas urbanas, motivaron a Prihandrijanti <i>et al.</i> (2008) a realizar un estudio de caso, en el cual empleó un análisis de costo y beneficio. De esta forma, demostró que los sistemas descentralizados de tratamiento son más factibles económicamente en comparación con los sistemas centralizados, para las condiciones específicas de la ciudad.
<i>China</i>	Beijing es la segunda ciudad más habitada del mundo, con 14 millones de habitantes, y está entre las 10 ciudades que más sufren por escasez de agua. A fin de afrontar esta problemática, Tianxu Garden, un área semiurbana ha dispuesto de la implementación de esquemas descentralizados para recuperar agua de la comunidad y reusarla en usos no potables (Zhang, 2008).
<i>Líbano</i>	Continuamente, el país ha sufrido de escasez de agua en temporadas de verano que se ve agravada por la débil y fragmentada voluntad institucional. Un proyecto que beneficio a 30 hogares de Tannoura donde se reciclaba el agua residual para riego de huertos familiares en las zonas periurbanas de la ciudad (Assayed, 2008; Haddad <i>et al.</i> , 2008).
<i>Japón</i>	En Tokio y Fukuoka se emplean tratamientos en sitio y semi-centralizados, algunos de ellos se exigen como norma para nuevas construcciones, para reuso no potable en los hogares, riego agrícola y zonas verdes urbanas y para reuso industrial (Suzuki <i>et al.</i> , 2002).
<i>Namibia</i>	Siendo un país emergente, situado en una región árida, sufre continuamente por la escasez de agua. En Windhoek se construyeron sistemas de manejo sostenibles como geo-purificación, lagunas y campos de irrigación, para la recarga de aguas subterráneas y cubrimiento de la demanda de agua (Volkman, 2003).
<i>Kenia</i>	Nairobi presenta un caso en el cual la brecha entre el suministro y demanda de agua tiende a aumentar al pasar el tiempo. Aplicando el enfoque de la GIAU, se proponen una serie de opciones que incluyen el reciclaje del agua residual para usos no potable dentro de las residencias. Las opciones se implementarían a nivel residencial, grupal o de ciudad (Jacobsen <i>et al.</i> , 2013).
<i>México</i>	Mediante un estudio de caso realizado en Xochimilco, una de las 16 delegaciones que tiene México D.F., se buscaba determinar el potencial aplicativo de tecnologías sostenibles en las zonas periurbanas de la ciudad. Concluye el estudio que la implementación y combinación de tecnologías descentralizadas permiten soluciones basadas en el contexto local de Xochimilco, proveyendo la oportunidad de reducir la contaminación ambiental y recuperar recursos valiosos para mejorar de manera sostenible los medios de subsistencia y el medio ambiente (Nanninga <i>et al.</i> , 2012).

Las experiencias indican que los esquemas descentralizados para el manejo del agua residual tiene una alta aplicación alrededor del mundo como una solución a los problemas de contaminación por los vertimientos de agua residual urbana.

## **4 MARCO CONCEPTUAL**

### **4.1 TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS (TGS)**

Ramírez (2002) considera que el enfoque de sistemas más que una teoría es una forma de pensar el mundo, pues está orientado hacia un pensamiento sistémico y de expansionismo, es decir, la relación que debe existir entre variables y fuerzas recíprocas con el fin de alcanzar objetivos. Es necesario que el sistema, como un todo, se estudie desde una perspectiva interdisciplinaria para lograr una visión completa del mismo. En este sentido, es importante tener en cuenta la interacción dinámica que ejerce cada una de las partes y procesos del sistema que se está evaluando para resolver los problemas de forma eficaz.

En el campo del agua residual, la implementación de una tecnología de tratamiento requiere de una visión integral e interdisciplinaria en la que debe tomarse en cuenta, además de la parte tecnológica, la parte económica, social y ambiental de la zona con el fin de tomar una decisión adecuada. De ahí que la TGS permite orientar la toma de decisiones en torno a la implementación de esquemas de manejo descentralizados, ya que considera la complejidad del sistema, los criterios y disciplinas que lo conforman.

### **4.2 PRINCIPIOS DE BELLAGIO**

Los principios de Bellagio rigen el nuevo enfoque en torno a la problemática de agua y saneamiento, cuyo objetivo es el acceso universal al saneamiento ambiental seguro dentro de un marco de seguridad para el agua y el medio ambiente y de respeto por el valor económico de los residuos (Kresse, 2000).

- a. La dignidad humana, la calidad de la vida y la seguridad del medio ambiente, al nivel de las viviendas, debe ser el centro del nuevo enfoque, el cual debe responder a las necesidades y las demandas locales y nacionales.
  - Las soluciones deben ser ajustadas a todo el espectro de intereses sociales, económicos, ambientales y de salud.
  - El ambiente, en las viviendas y en las comunidades, debe ser protegido.
  - Las oportunidades económicas de la recuperación y el uso de los desechos, deben ser valoradas.
- b. Paralelamente con los principios del buen gobierno, la toma de decisiones debe hacerse con la participación de todos los actores, especialmente de los consumidores y los proveedores de los servicios.



- La toma de decisiones, en todos los niveles, debe estar basada en opciones bien informadas.
  - Los incentivos para la provisión y el consumo de los servicios deben ser objetivas y consistentes con el propósito general.
  - Los derechos de los consumidores y de los proveedores deben estar balanceados con las responsabilidades hacia la comunidad humana y el medio ambiente.
- c. Los residuos deben ser considerados como un recurso y su manejo debe ser holístico y formar parte de los procesos integrados del manejo de los recursos hídricos, los flujos de nutrientes y los residuos.
- Las entradas de residuos deben reducirse, de tal forma que se promueva la eficiencia y la seguridad del agua y el ambiente.
  - Las salidas de residuos deben minimizarse para promover la eficiencia y reducir la expansión de la contaminación.
  - El agua residual debe ser reciclada e incluida dentro del presupuesto hídrico.
- d. El ámbito dentro del cual se resuelven los problemas de saneamiento ambiental debe mantenerse en un tamaño mínimo y práctico (vivienda, comunidad, pueblo, distrito, cuenca, ciudad) y los residuos deben diluirse lo menos posible.
- Los residuos deben ser manejados tan cerca de su fuente como sea posible.
  - El uso del agua para el transporte de residuos debe reducirse al mínimo.
  - Deben desarrollarse tecnologías adicionales para el reuso y la estabilización de los residuos.

Mediante la implementación de esquemas descentralizados para el manejo del agua residual se puede cumplir con los objetivos descritos anteriormente, ya que permiten responder a las demandas y necesidades de la comunidad aprovechando el agua residual como recurso para diversas actividades que hacen posible su reuso de forma segura.

### **4.3 GESTIÓN INTEGRADA DEL AGUA URBANA (GIAU)**

La característica principal de la GIAU consiste en que el sistema hídrico de una zona urbana (residencia, grupo de residencias, vecindario, etc.) se analice como un solo sistema integrado. Esto permite el análisis de las fuentes hídricas locales disponibles (agua lluvia, agua subterránea, agua pluvial, agua residual tratada) para su uso en varios propósitos (como jardinería, descarga de inodoros) lo que reduce la demanda de agua potable. Así mismo, se disminuye los impactos ambientales asociados con la toma del agua en grandes cantidades y su transporte a través de largas distancias (Mitchell, 2004). Esta teoría es la base sobre la cual se sostiene la implementación de esquemas descentralizados para el manejo del agua residual en zonas urbanas.

Basándose en Mitchell (2004), los principios de la GIAU se resumen en:

- Considerar todas las partes del ciclo del agua, natural y construido, superficial y sub-superficial, reconociéndolas como un sistema integrado.
- Considerar todas las necesidades de agua, tanto antropogénicas como ecológicas.
- Considerar el contexto local, teniendo en cuentas las perspectivas económicas, culturales, sociales y ambientales.
- Incluir a todos los actores decisorios en el proceso.
- Garantizar la sostenibilidad y el equilibrio en las necesidades económicas, sociales y ambientales en el corto, mediano y largo plazo.

La Figura 4.1 describe algunas de las actividades interrelacionadas que considera la GIAU, donde intervienen el sector institucional y la planeación urbana para lograr calidad de vida y conservación del medio ambiente.

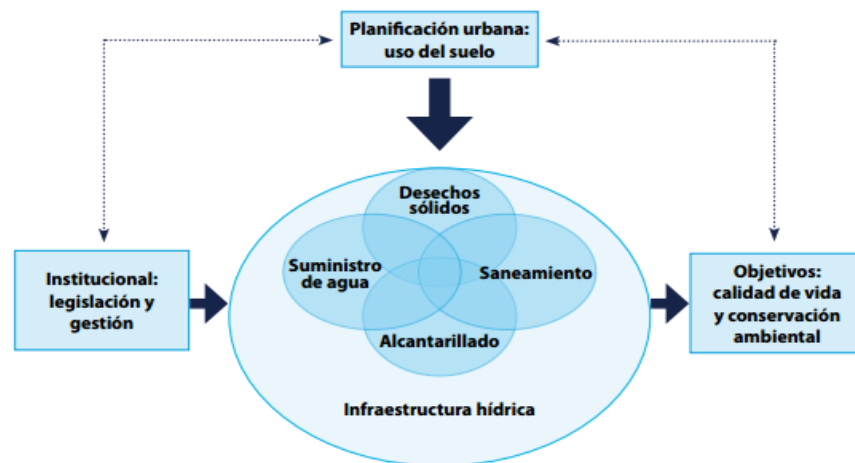


Figura 4.1. Gestión integrada de aguas urbanas

Fuente: Parkinson *et al.* (2010)

#### 4.4 SANEAMIENTO CENTRADO EN LA VIVIENDA

El saneamiento centrado en la vivienda atribuye la importancia al hogar como punto focal para la planificación de saneamiento ambiental, invirtiendo el esquema tradicional de la planificación que va desde el nivel central (arriba), hacia los usuarios (abajo). Se fundamenta en que el usuario de los servicios debe tener voz decisoria en el diseño de los mismos, y que los problemas de saneamiento ambiental deben ser resueltos lo más cerca del lugar de su generación. Solo en caso de no existir una solución a los problemas desde el nivel de la vivienda, deben trasladarse a un nivel de vecindario, localidad, ciudad y así sucesivamente hasta la más amplia jurisdicción (Schertenleib, 2001). Para garantizar que el esquema de manejo descentralizado que se va a implementar sea sostenible, se debe partir de este concepto que atribuye al usuario del servicio la mayor relevancia en la concepción y ejecución del proyecto de saneamiento. Para Schertenleib (2011) se trata de la

participación de todos los actores (gobierno, sector privado, comunidad) desde las primeras etapas del proyecto, empezando desde un nivel de vivienda como lo muestra la Figura 4.2.

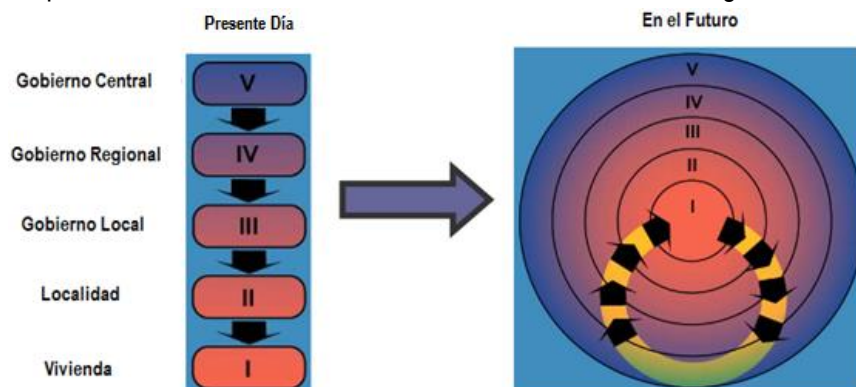


Figura 4.2. Enfoque del saneamiento centrado en la vivienda

Fuente: Massoud *et al.* (2009); Schertenleib (2011)

Al incluir este enfoque en los proyectos de agua y saneamiento se fomenta el empoderamiento y liderazgo de los miembros de las comunidades, y se cambia el papel de los gobiernos, que pasan de ser proveedores de los servicios a facilitadores (Schertenleib, 2001).

## 4.5 ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR AGUAS RESIDUALES

### 4.5.1 Producción más limpia (PmL)

La PmL es un enfoque en el que los procesos y actividades se llevan a cabo de tal forma que el impacto ambiental de los mismos se reduzca tanto como sea posible (Siebel y Gijzen, 2002). Al asociar este concepto al manejo del agua urbana, los desechos empiezan a verse como recursos y su gestión vinculada a la de los recursos hídricos y nutrientes. Además de promover el ahorro del agua, este enfoque de reuso podría generar algunos incentivos financieros que podrían ser utilizados para cubrir parte de los gastos del tratamiento del agua residual.

Basados en el enfoque de la PmL, Nhapi y Gijzen (2005) proponen 3 pasos de intervención en el manejo del agua urbana: i) minimizar la producción de aguas residuales reduciendo el consumo de agua y la generación de residuos; ii) tratamiento y reuso óptimo del agua y los nutrientes a menor escala posible, por ejemplo a nivel de parcelaciones o pequeñas comunidades, y una vez empleados el primer y segundo pasos al máximo, iii) fortalecer la capacidad de autodepuración de los cuerpos receptores (lagos, ríos, etc), mediante la intervención. El éxito de estos 3 pasos depende de una planificación apropiada y del apoyo legal e institucional. En la Figura 4.3 se representa el modelo de los 3 pasos recomendado por Nhapi y Gijzen (2005).

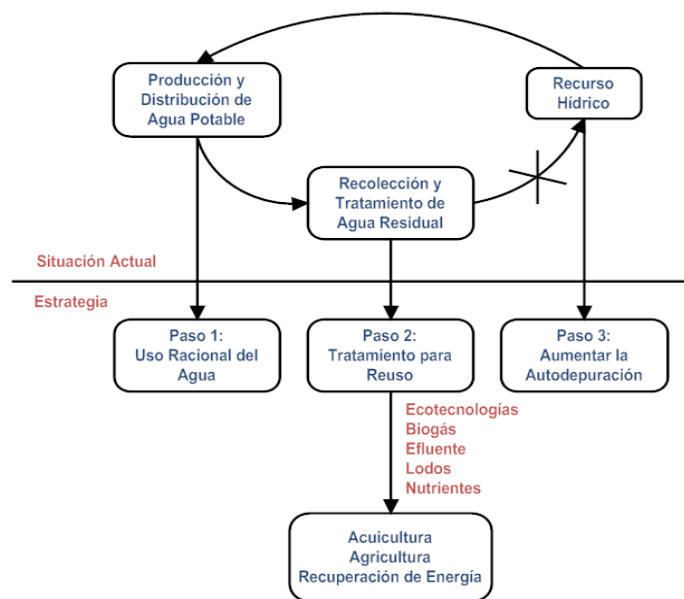


Figura 4.3. Enfoque Estratégico de los 3 Pasos

Adaptado de Nhapi y Gijzen (2005)

Lo que se busca con este enfoque es minimizar al máximo los vertimientos de agua residual en los cuerpos receptores, y fomentar el aprovechamiento de este recurso mediante el reuso en actividades que generen ingresos económicos al tiempo que reduzcan el impacto ambiental, objetivos que se pueden cumplir a través de la implementación de esquemas descentralizados.

#### 4.5.2 Uso eficiente del agua

El uso eficiente del agua implica utilizar tecnologías y prácticas mejoradas que proporcionan igual o mejor servicio con menos agua. Para Baumann *et al.* (1980) el uso eficiente del agua es cualquier reducción o prevención de pérdida del agua que sea de beneficio para la sociedad. Las medidas de eficiencia deben tener sentido social y económico, además de reducir el uso del vital líquido por unidad de actividad. El uso eficiente del agua es básico para el desarrollo sostenible (o sea, el uso de los recursos de la tierra por los habitantes de hoy) y para asegurar que haya suficientes recursos para generaciones futuras (Tate, 2006). El Centro Nacional de Producción Más Limpia (CNPMLTA, 2010) divide en 2 las prácticas que se llevan a cabo para lograr un uso eficiente del agua, clasificándolas en:

- *Prácticas de Ingeniería:* se categorizan en tres tipos: reducción de las pérdidas, reducción del uso del agua en general y la aplicación de prácticas de reuso del agua. Esta última se refiere a la implementación de esquemas descentralizados que potencializan el reuso del agua residual en aplicaciones que no requieran alta pureza de la misma como por ejemplo la irrigación de jardines, usos estéticos o protección contra incendios. En otras palabras, debe ser utilizada para un propósito benéfico teniendo en cuenta las reglas aplicables.

- *Prácticas de Conducta:* involucran un cambio en los hábitos de consumo del agua para lograr un uso más eficiente de la misma y la reducción de su consumo total en una instalación industrial, comercial o en una residencia.

#### 4.5.3 Tratamiento del Agua Residual

Los propósitos de tratamiento del agua residual dependen del destino final del efluente, y pueden ser:

- Separar o remover del vertimiento los constituyentes indeseables
- Modificar las propiedades fisicoquímicas o biológicas del residuo con el fin de alcanzar niveles compatibles con los requerimientos de las descargas

En general, los procesos de tratamiento se categorizan como transporte de momento, masa o calor o combinación de los mismos. De acuerdo con ello, se clasifican en: *procesos físicos*, *procesos químicos* y *procesos biológicos* (Collazos, 2008a).

En atención a un orden de gradualidad, un proceso de tratamiento se puede implementar secuencialmente como lo ilustra la Figura 4.4.

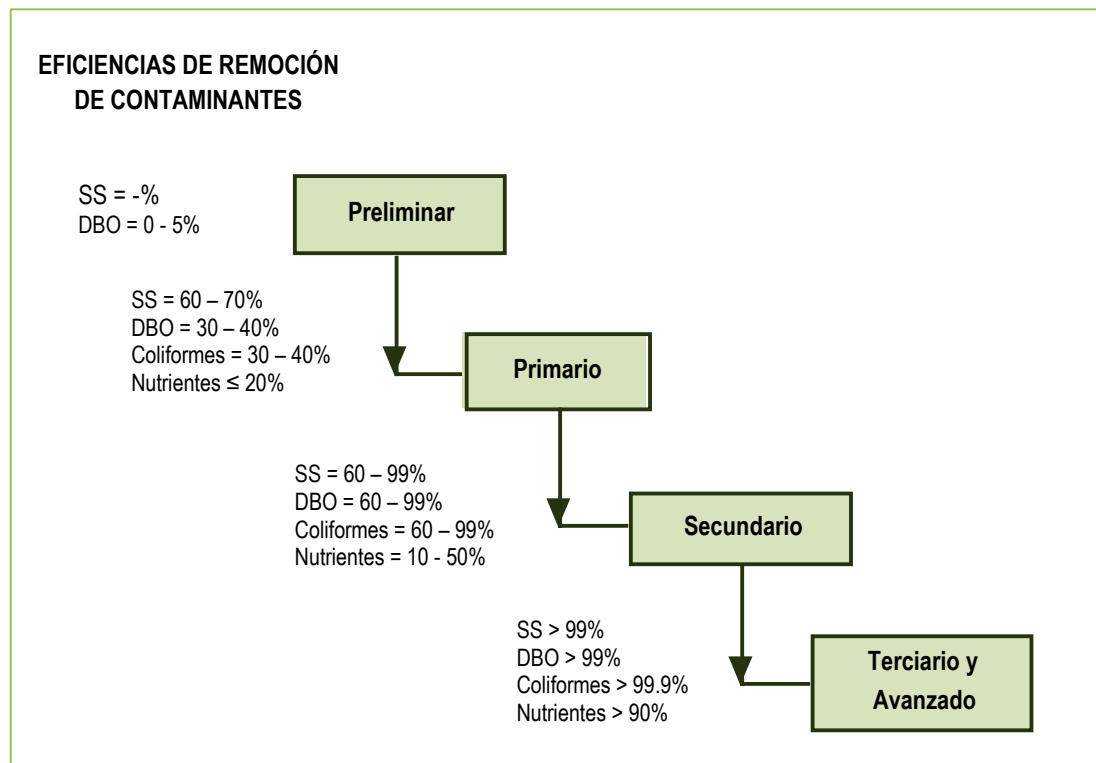


Figura 4.4. Eficiencias de remoción por nivel de tratamiento

Fuente: Adaptado de Collazos (2008a); Metcalf y Eddy (2003); von Sperling (1996)

La Tabla 4.1 muestra la descripción de cada nivel de tratamiento del agua residual.

Tabla 4.1. Niveles de tratamiento

Nivel de tratamiento	Descripción
<i>Preliminar</i>	Remoción de sólidos gruesos en suspensión (material grueso y arenas), que pueden causar problemas en la operación y mantenimiento de las unidades de tratamiento posteriores. También se remueve hasta el 5% de la DBO en este proceso.
<i>Primario</i>	Remoción del 60 al 70 % de los sólidos en suspensión y del 30 al 40 % de la DBO. Es posible alcanzar una mayor remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica a través de un tratamiento avanzado, generalmente logrado a partir de la adición de químicos o la filtración. Se remueve hasta 40% de coliformes y menos del 20% de los nutrientes.
<i>Secundario</i>	Remoción del 60 a 99% de la DBO, sólidos suspendidos y coliformes. Se remueve entre 10 y 50 % de los nutrientes.
<i>Terciario y avanzado</i>	Remoción de más del 99% de sólidos suspendidos y DBO. Remoción de patógenos, nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados, compuestos no biodegradables y sólidos inorgánicos disueltos. Se emplea cuando se requiere el agua tratada para reuso en varias aplicaciones que demanden buena calidad de esta.

Fuente: Crites y Tchobanoglous (1998); Metcalf y Eddy (2003); Torres (2011); von Sperling (1996)

## 4.6 SOSTENIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE MANEJO DE AGUA URBANA

La sostenibilidad de los sistemas de manejo de agua urbana se trata de un concepto que abarca distintas dimensiones: i) social, buscando satisfacer todas las necesidades del ser principalmente las más elementales; ii) económica, como lenguaje de mediación de la organización social entre los recursos naturales existentes y las necesidades de las personas y iii) ambiental, en cuanto al funcionamiento de los ecosistemas y su limitada capacidad para proveer los elementos básicos para satisfacer las necesidades de la población (Nudelman y Pérez 2006).

Grotter y Otterpohl (1996) se refieren a unos principios generales que están vinculados con el desarrollo sostenible. Ellos son:

- Usar menos energía y materiales en las actividades de producción
- No transferir problemas en espacio o tiempo a otros individuos
- Minimizar la degradación del aire, agua y suelo

Aplicando estos principios en los sistemas de manejo de agua urbana se construyen los siguientes principios:

- Minimizar las distancias de transporte de agua cruda y agua residual
- Donde resulte posible, captar las aguas lluvias desde los tejados, preferiblemente para suministro en la vivienda
- Descentralizar los sistemas de manejo del agua urbana
- Incrementar la responsabilidad de las personas en la calidad del agua urbana

La implementación del enfoque estratégico de los 3 pasos y/o los principios de Bellagio crearían un sistema de manejo del agua urbana enfocado en el reciclaje (residuos = recursos) reduciendo la demanda externa de agua, energía y químicos. La contaminación generada en el sistema también se reduciría; sin embargo, se sugiere una adaptación del cuarto principio de Bellagio del cual se asume que los sistemas descentralizados para manejo del agua residual son en definición más sostenibles. La literatura evidencia que esto es cierto bajo ciertas condiciones, ya que se ha demostrado que es la economía de escala de los sistemas centralizados la más adecuada. Por ello, este principio se ajusta por uno más general donde la sostenibilidad del sistema requiere ser optimizada, basado en algún tipo de “valoración de la sostenibilidad” (van der Steen, 2007).

Este concepto de sostenibilidad para los sistemas de agua urbana lo trabajan Lundin y Morrison (2002), quienes desarrollaron el método de valoración del ciclo de vida para evaluar la sostenibilidad ambiental de los sistemas de agua urbana. En su trabajo los límites del sistema se escogieron más amplios de lo comúnmente visto, como lo muestra la Figura 4.5, en vista que el sistema incluye el ciclo completo del agua urbana, así como la disposición de lodos, consumo de materiales y energía y la agricultura (Lundin y Morrison, 2002).

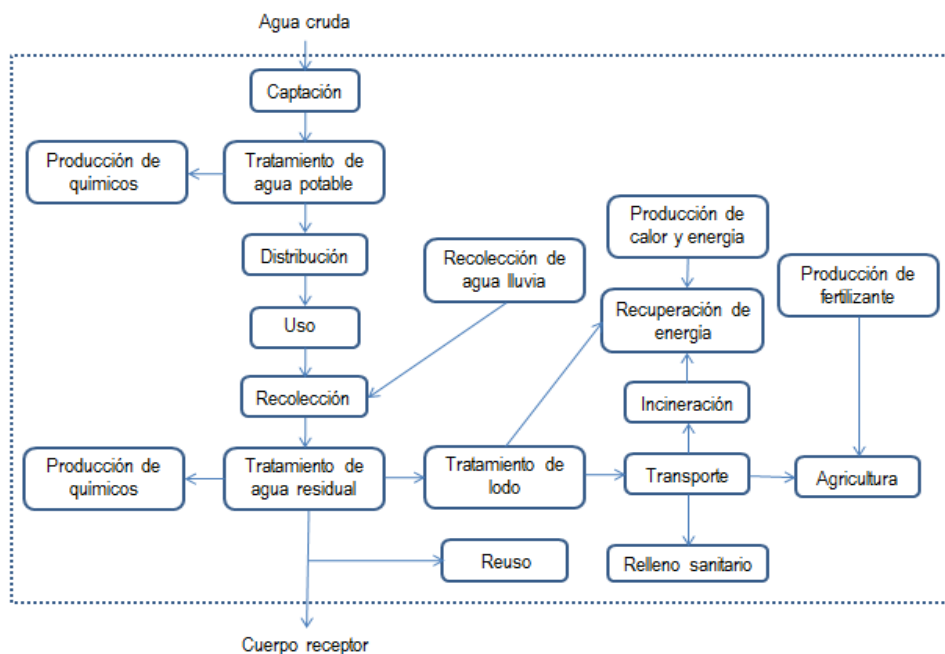


Figura 4.5. Sistema sostenible de gestión del agua urbana  
Adaptado de Lundin y Morrison (2002)

La valoración de la sostenibilidad del sistema se basa en la identificación de una serie de “indicadores de sostenibilidad”. El puntaje de estos indicadores se emplea para decidir entre diversas opciones de manejo del agua. A través del Análisis Multi-Criterio se define la mejor opción, dando pesos a los diferentes indicadores (Lundin y Morrison, 2002).

## 4.7 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA

Una de las decisiones más importantes cuando se planifica un proyecto de saneamiento es la selección de tecnología, ya que la adopción de un sistema inapropiado pone en riesgo su sostenibilidad. La selección de tecnología debe ser un proceso participativo desde el diagnóstico de la situación actual, la identificación de prioridades, la formulación de alternativas de solución y la escogencia de la mejor opción que permita responder a la demanda de saneamiento de la población; planteando soluciones que consideren de manera integral los aspectos socioeconómicos, culturales, ambientales, institucionales, político y jurídicos de los usuarios potenciales (Aragón, 1999).

En este contexto se considera que la tecnología debe estar en armonía con la cultura local y en concordancia con la capacidad financiera y técnica de la comunidad. En lo posible el uso de la tecnología debe conducir a una autonomía de la comunidad con respecto a recursos externos, sobre todo en los aspectos de operación y mantenimiento (Aragón, 1999).

La implementación de un sistema de tratamiento de agua residual debe cumplir una serie de etapas que van desde la fijación de los estándares hasta la puesta en marcha del sistema. Esto se puede representar en la Figura 4.6, donde se muestra una relación entre las etapas del proceso (eje X) y el nivel de influencia (eje Y) que cada una de estas representa. Las dos primeras etapas son fundamentales para garantizar la selección de la mejor opción tecnológica a ser implementada y la sostenibilidad del sistema, las tres etapas posteriores son complementarias y son consecuencia de las decisiones que se tomen en las dos primeras.

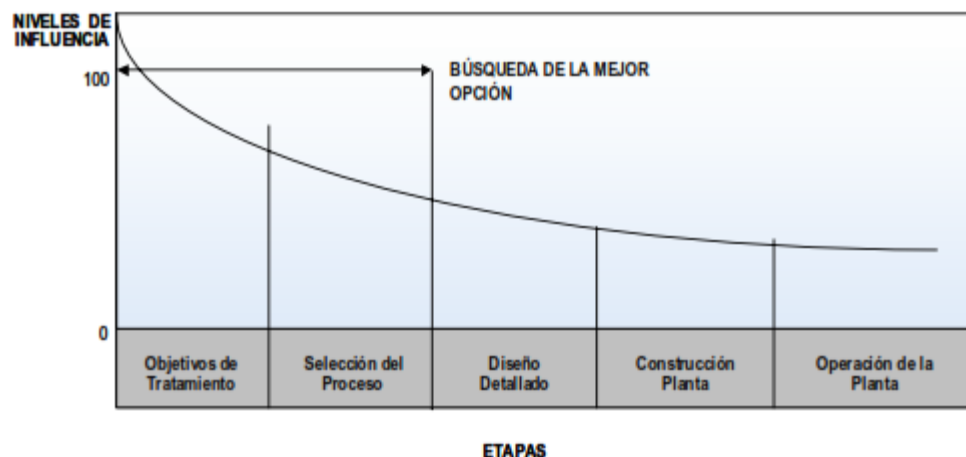


Figura 4.6. Etapas de la implementación de un sistema de tratamiento de agua residual

Fuente: Adaptado de Minambiente (1998)

Para la selección de un sistema de tratamiento de agua residual se deben tener en consideración ciertos aspectos que guíen el proceso de selección hacia la mejor tecnología, teniendo en cuenta las



condiciones económicas, sociales y ambientales locales. Buscando acertar con la decisión correcta, Horan y Parr (1994) proponen el uso de una lista que incluya los factores tecnológicos, ambientales, sociales, institucionales y económicos de una localidad en particular como base fundamental para el desarrollo de metodologías de selección de tecnología enmarcadas dentro del concepto de sostenibilidad y cumplimiento de los estándares de vertimiento. La Tabla 4.2 muestra estos factores de selección.

Tabla 4.2. Factores a considerar en el proceso de selección para el manejo sostenible

Factor a considerar	Importancia
<p><b>Económico</b></p> <p>Estructura, componente industrial, empleo, cambio extranjero de moneda.</p> <p>Tamaño: prospectos futuros, balance de anticipos, relaciones comerciales, vulnerabilidad, cambio extranjero de moneda y disponibilidad de capital, distribución de ingresos.</p>	<p>Dependencia en los sectores de la economía: estos pueden limitar o favorecer una opción tecnológica para el tratamiento de agua residual</p> <p>La habilidad para manejar, adoptar, pagar y sostener una tecnología</p>
<p><b>Capacidad institucional</b></p> <p>Papeles y responsabilidades para la organización, relación entre departamentos, nivel de apoyo</p> <p>Existencia de infraestructura: funcionamiento y operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de agua residual existentes, pérdidas de agua</p> <p>Legislación: responsabilidades y capacidades de las políticas y regulaciones</p> <p>Política, soborno y corrupción</p> <p>Finanzas: fuentes, disponibilidad, relaciones con donantes, agencias de ayuda, apoyo del sector privado, disponibilidad de pago</p>	<p>La habilidad y disposición para expandir y asimilar los cambios, pueden ayudar a la escogencia de cierta opción tecnológica de acuerdo con los requerimientos de personal y su entrenamiento.</p> <p>La habilidad para expandir y asimilar los cambios relacionados con los aspectos de operación y mantenimiento y el manejo del agua, pueden influir en la elección de cierta opción tecnológica.</p> <p>Habilidad para manejar el cambio</p> <p>Efectos fundamentales en todos los procesos</p> <p>Consideraciones básicas: de acuerdo con quien paga y como paga, consideración que se debe tener en cuenta en todas las fases del proyecto</p>
<p><b>Factores tecnológicos</b></p> <p>Nivel de educación, habilidades, estructura de la fuerza de trabajo, entrenamiento</p> <p>Disponibilidad de materiales, conocimiento y experiencia locales</p>	<p>Habilidades que se deben tener en cuenta para el manejo de tecnologías de tratamiento de residuos</p> <p>Pueden influir a favor de cierta opción tecnológica</p>

Tabla 4.2. Factores a considerar en el proceso de selección para el manejo sostenible (continuación)

Factor a considerar	Importancia
<p><b>Factores tecnológicos</b></p> <p>Características del agua residual: composición, variaciones de caudal, origen, componentes industriales</p> <p>Problemas de disposición de lodos</p> <p>Estándares de descarga y control</p>	<p>Pueden influir a favor de ciertas tecnologías, de acuerdo con el problema a ser solucionado: remoción de nutrientes, sobrecargas, variaciones de caudal, toxicidad.</p> <p>A menudo un problema subestimado</p> <p>Parámetros que garanticen la protección de la salud y la ecología</p>
<p><b>Factores ambientales</b></p> <p>Clima, disponibilidad de terreno y patrones de uso, geología, condiciones del suelo</p> <p>Hidrología (lluvias, caudales de los ríos); características de las aguas subterráneas, corrientes oceánicas (solo si aplican)</p> <p>Usos del agua: uso doméstico, agrícola (irrigación), tendencias futuras.</p> <p>Recursos de agua: disponibilidad, confiabilidad, cantidad, calidad, tendencias futuras.</p> <p>Factores especiales: presencia de áreas sensitivas (arrecifes, manglares, bosques) hábitat de vida salvaje, áreas de riesgo de eutrofización.</p> <p>Impacto de cualquier planta: ruido, olores, insectos, roedores, consideraciones de salud e impacto visual</p>	<p>Influyen a favor de ciertas tecnologías (incluyendo disposición de lodos)</p> <p>Capacidad de dilución / asimilación</p> <p>Manejo y demanda de agua, reuso del agua residual y posibilidades de reciclaje</p> <p>Manejo y demanda de agua, reuso del agua residual y posibilidades de reciclaje</p> <p>Puede necesitar protección especial, relacionadas con los estándares para efluentes</p> <p>Puede ser considerado antes de la selección</p>
<p><b>Factores sociales</b></p> <p>Características de la salud: enfermedades relacionadas con patógenos de origen fecal, disponibilidad de servicios de salud</p> <p>Demografía: distribución de población (edad y localización, tasas de crecimiento), migración, urbanización</p> <p>Aspectos culturales y religiosos: incluyendo aspectos de saneamiento</p> <p>Facilidades en los hogares, tipo y distribución</p>	<p>Puede necesitar ciertos tipos de tratamiento para protección de la salud</p> <p>Necesidades y demandas presentes y futuras</p> <p>Pueden influir a favor de ciertas opciones tecnológicas</p> <p>Pueden influir a favor de ciertas opciones tecnológicas</p>

Tabla 4.2. Factores a considerar en el proceso de selección para el manejo sostenible (continuación)

Factor a considerar	Importancia
<p><b>Factores sociales</b></p> <p>Características de la salud: enfermedades relacionadas con patógenos de origen fecal, disponibilidad de servicios de salud</p> <p>Demografía: distribución de población (edad y localización, tasas de crecimiento), migración, urbanización</p> <p>Aspectos culturales y religiosos: incluyendo aspectos de saneamiento</p> <p>Facilidades en los hogares, tipo y distribución</p> <p>Consideraciones estéticas, grupos de presión, consideraciones de bienestar y equidad, disponibilidad a pagar por el mejoramiento del sistema de tratamiento de agua residual</p> <p>Usos del terreno</p> <p>Usos y demanda de agua: tarifas, métodos y habilidad para cobrar, disponibilidad a pagar por el agua</p>	<p>Puede necesitar ciertos tipos de tratamiento para protección de la salud</p> <p>Necesidades y demandas presentes y futuras</p> <p>Pueden influir a favor de ciertas opciones tecnológicas</p> <p>Pueden influir a favor de ciertas opciones tecnológicas</p> <p>Pueden influir a favor de ciertas opciones tecnológicas</p> <p>Pueden influir a favor de ciertas opciones tecnológicas</p> <p>Pueden influir a favor de ciertas opciones tecnológicas, además de consideraciones sobre el manejo del agua (necesidad para reuso, por ejemplo)</p>

Fuente: Horan y Parr (1994)

Por otra parte, Massoud *et al.* (2009) identifican algunas características generales a tener en cuenta para la selección de tecnología, para que esta sea apropiada al contexto en el cual se implementa, con base en la factibilidad económica, sostenibilidad ambiental y la aceptación social, como se muestra en la Figura 4.7.

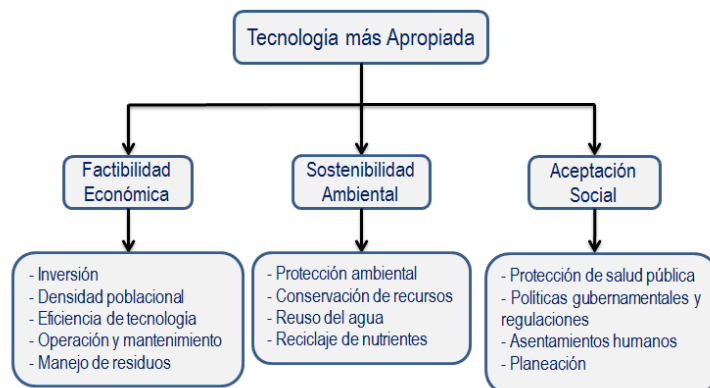


Figura 4.7. Características de la tecnología más apropiada

Fuente: (Massoud *et al.*, 2009)

## **5 OBJETIVOS**

### **5.1 OBJETIVO GENERAL**

Contribuir a la sostenibilidad de los sistemas de manejo de aguas residuales urbanas a partir de la definición de aspectos claves para implementar esquemas descentralizados en áreas urbanas de Colombia.

### **5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Revisar el estado del arte y experiencias sobre descentralización en el manejo del agua residual en zonas urbanas.
- Identificar los aspectos claves desde el punto de vista tecnológico, ambiental, económico y social de la descentralización para el manejo del agua residual urbana.
- Definir los aspectos claves para implementar esquemas de manejo descentralizados sostenibles en zonas urbanas de Colombia.

## **6 METODOLOGIA**

### **6.1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y EXPERIENCIAS SOBRE DESCENTRALIZACIÓN**

Inicialmente se realizó una revisión del estado del arte sobre descentralización para el manejo del agua residual municipal. Se identificaron aspectos de la descentralización en el mundo, así como ventajas, desventajas, beneficios, limitantes y factores que potencializan la implementación de sistemas descentralizados en zonas urbanas, teniendo en cuenta los aspectos económicos, institucionales, tecnológicos, sociales y ambientales. También se definen los límites que abarcan los sistemas de manejo de acuerdo con el nivel de descentralización. Mediante la revisión, se identificaron de forma general experiencias de países en desarrollo y desarrollados que han implementado esquemas descentralizados de manejo de agua residual para zonas urbanas y los aspectos que se han tomado en cuenta en su selección e implementación.

### **6.2 IDENTIFICACIÓN DE INDICADORES CLAVES PARA LA DESCENTRALIZACIÓN EN EL MANEJO DEL AGUA RESIDUAL**

Después de revisar el estado del arte y las experiencias sobre descentralización, se elaboró una tabla donde se incluyeron los aspectos, variables e indicadores identificados en la literatura, además de las experiencias analizadas. Teniendo en cuenta los autores que mencionaron cada indicador, se marcó con una x la casilla correspondiente al indicador mencionado por cierto autor. De esta forma, se logró determinar el número de experiencias que consideraron importante la inclusión de cada indicador para la implementación de esquemas descentralizados. Mediante el cruce de información se obtuvieron los aspectos, variables e indicadores claves para la selección de un sistema adecuado y sostenible dentro de los aspectos económico e institucional, tecnológico, social y ambiental, para el manejo del agua residual urbana. También, se definió el alcance y significado de cada indicador de acuerdo con el contexto mencionado en las experiencias.

### **6.3 DEFINICIÓN DE INDICADORES CLAVES PARA IMPLEMENTACIÓN DE ESQUEMAS DESCENTRALIZADOS EN COLOMBIA**

Se desarrolló la encuesta dirigida a un grupo de expertos de diversos sectores relacionados con el área del manejo del agua residual en Colombia. Se evaluaron los indicadores relacionados con aquellos identificados en la revisión de experiencias que son importantes para la selección de tecnologías descentralizadas en las zonas urbanas de Colombia. Luego, se aplicó una metodología de decisión multicriterio, para facilitar el análisis de los datos.

### *Aplicación de una metodología de decisión multicriterio*

Los procesos de toma de decisiones en los proyectos ambientales a menudo implican impactos sobre varios aspectos: impactos sociales, políticos, económicos y ambientales. El análisis multicriterio constituye un instrumento racional y objetivo tanto para mejorar la comprensión de los procesos de decisión, como para ayudar a los decisores a abordar la necesaria comparación entre alternativas (Romero, 1996). La técnica básicamente emplea datos sobre el desempeño de las opciones que compiten contra los objetivos propuestos por el centro decisor y desarrolla las funciones de utilidad compuesta para cada opción (Wilson *et al.*, 2001).

Considerando datos cualitativos y cuantitativos, el modelo ayuda en la estructuración y compensación de los criterios de disparidad. Para Wilson *et al.* (2001) la preferencia relativa sobre cierta alternativa puede ser juzgada al cuantificar su desempeño contra una serie de objetivos, atributos o dimensiones relevantes, que describen el “valor” de cada opción. Es común que se encuentre que una opción resulte mejor al compararla con todos los objetivos, lo que la hace preferida.

De acuerdo con Nguyen (2003) los métodos de análisis multicriterio se dividen en 5 grupos principales: Clasificación/Calificación, Teoría de utilidad multi-atributo/Teoría de valores, Proceso Analítico Jerarquizado (AHP) por sus siglas en inglés, ELECTRE y PROMETHEE, y la Programación Matemática. El propósito común de estos métodos es evaluar y escoger alternativas de acuerdo con múltiples criterios usando análisis sistemáticos que superan las limitaciones observadas de los decisores.

En este estudio se consideró la metodología de Clasificación/Calificación (Ranking/Rating) para priorizar los indicadores claves a considerar en la implementación de esquemas descentralizados en zonas urbanas colombianas. La evaluación de los indicadores mediante esta técnica proviene de información subjetiva y objetiva expresada como valores en una escala numérica. Mediante ella, es posible combinar juicios subjetivos con evaluaciones objetivas (Singhirunnusorn, 2009).

#### Clasificación (Ranking)

La Clasificación regular asigna un puntaje a cada elemento relevante para el proceso de decisión dependiendo de su importancia percibida. El puntaje se asigna de acuerdo con una escala de nueve puntos (1, no es importante; 3, menos importante; 5, moderadamente importante; 7, importante; 9, extremadamente importante) (Singhirunnusorn, 2009).

La Clasificación ordinal es una técnica donde a cada experto se le pide poner la lista de elementos de decisión en orden de importancia. Contrario a la forma regular donde los diferentes elementos pueden tener el mismo puntaje, la Clasificación ordinal obliga a los expertos a poner los elementos en orden jerárquico de importancia; cada elemento se considera más o menos importante con

respecto a los otros elementos implicados. Este método se emplea principalmente a la hora de seleccionar los indicadores a tener en cuenta de un amplio conjunto de elementos de decisión (Macoun y Prabhu, 1999).

Para este estudio se empleó la Clasificación regular, entendiendo que permite dar igual puntaje a dos o más elementos claves y, adicionalmente, proporciona una escala de puntuación ideal para la clasificación según la importancia de cada uno de ellos (Macoun y Prabhu, 1999).

### Calificación (Rating)

La Calificación es una técnica donde se le pide a cada experto dar un puntaje a cada elemento de decisión entre 0 y 100. Los puntajes para todos los elementos comparados deben sumar 100. Una ventaja de esta técnica es que permiten tanto una medida de importancia cardinal como ordinal para cada indicador. La importancia ordinal se refiere al orden de importancia de la lista de elementos, mientras que la importancia cardinal se refiere a la diferencia en magnitud entre la importancia de dos elementos; así un elemento puede ser tres veces más importante que otro (Macoun y Prabhu, 1999).

### Definición del peso relativo

Una vez los expertos asignaron un puntaje y una calificación para cada elemento de decisión, sus respuestas fueron analizadas. El objetivo de este análisis fue calcular el peso relativo, o importancia, de cada elemento de decisión basado en una síntesis de las diferentes respuestas otorgadas (Macoun y Prabhu, 1999).

Hay diferentes formas para estimar el peso relativo ( $w_j$ ) asociado con cada indicador. Mendoza y Prabhu (2000) describen un número de metodologías para calcular los pesos. En este estudio, para la técnica de la Clasificación (Ranking) se empleó un procedimiento simple que incluye pesos estandarizados como sigue:

$$w_j = \frac{a_j}{\sum a_j} \times 100;$$

Donde  $a_j$  es el puntaje promedio del indicador  $j$ , que se divide por la sumatoria de los puntajes promedio de la variable analizada.

Para la Calificación (Rating), de acuerdo con Singhirunnusorn (2009) el peso de los elementos de decisión se asignan explícitamente en el cuestionario para que sumen 100 puntos (la suma de los pesos). Por lo tanto, los pesos de todos los elementos pueden describirse usando la siguiente fórmula lógica:

$$0 \leq w_j \leq 100; \text{ y } \sum w_j = 100$$

Donde  $w_j$  es el peso relativo.

### Cálculo del peso combinado

Finalmente para calcular el peso combinado, los pesos relativos calculados por las técnicas de Clasificación (Ranking) y Calificación (Rating) se promediaron. De esta forma fue posible comparar y decidir los indicadores de decisión a tener en cuenta en el proceso (Macoun y Prabhu, 1999). Así, se obtiene la siguiente fórmula:

$$W = \frac{w_{jp} + w_{jc}}{2}$$

### Manejo estadístico de los datos

Se empleó la estadística descriptiva, a saber promedio, desviación estándar, moda, máximos y mínimos de los datos que se recolectaron.

El promedio o media aritmética es la cantidad o valor medio que resulta de dividir la suma de todos los valores entre el número de estos. Así se obtiene:

$$\chi = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde  $\chi$  es el promedio y  $n$  es la suma del número de datos  $x$  de la muestra recogida.

La desviación típica o desviación estándar en una medida de la dispersión para variables de razón y de intervalo. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \chi)^2}$$

Así la desviación estándar es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las diferencias entre cada valor de la variable ( $x_i$ ) y la media aritmética ( $\chi$ ) de la distribución.

La moda es el valor que se presenta con mayor frecuencia en una distribución de datos. Los máximos y mínimos hacen referencia al valor más grande y al más pequeño de la distribución de datos.



## 7 RESULTADOS

### 7.1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y EXPERIENCIAS SOBRE DESCENTRALIZACIÓN

#### 7.1.1 Centralización vs descentralización en el manejo del agua residual municipal

Basados en la filosofía del “al final del tubo”, los sistemas de manejo centralizado de las aguas residuales han sido la estructura de selección en la mayoría de las ciudades y países (Schertenleib, 2001); sin embargo, este enfoque está cambiando por uno que sugiere el tratamiento y reuso del agua residual lo más cerca posible del punto de generación. De aquí surge el concepto sobre las alternativas de descentralización en el manejo del agua residual. Libralato *et al.* (2012) proponen diferentes niveles de descentralización como muestra la Figura 7.1.

**Tratamiento Centralizado:** consiste en un sistema de recolección de las aguas residuales a través de un alcantarillado hacia una planta de tratamiento de aguas residuales generalmente localizada en las afueras de la ciudad (Libralato *et al.*, 2012). Son sistemas costosos en construcción y operación, especialmente en zonas con densidades poblacionales bajas (Massoud *et al.*, 2009), aunque también presenta estos problemas en zonas densamente pobladas cuando no existe una adecuada planeación ni apoyo institucional y político para implementar estas tecnologías.

**Tratamiento descentralizado:** se define como aquel sistema de tratamiento cuyo fundamento es que el agua debe tratarse lo más cerca posible del lugar de generación (Wilderer y Schreff, 2000). Significa que no hay solo una planta de tratamiento sirviendo una población en un área determinada, sino que, seguramente, habrá más de una y, probablemente, con un surtido amplio de tecnologías. Estos sistemas evitan el uso extensivo de tuberías y lo relacionado con trabajos de excavación para crear un sistema o red de recolección compuesto (Libralato *et al.*, 2012).

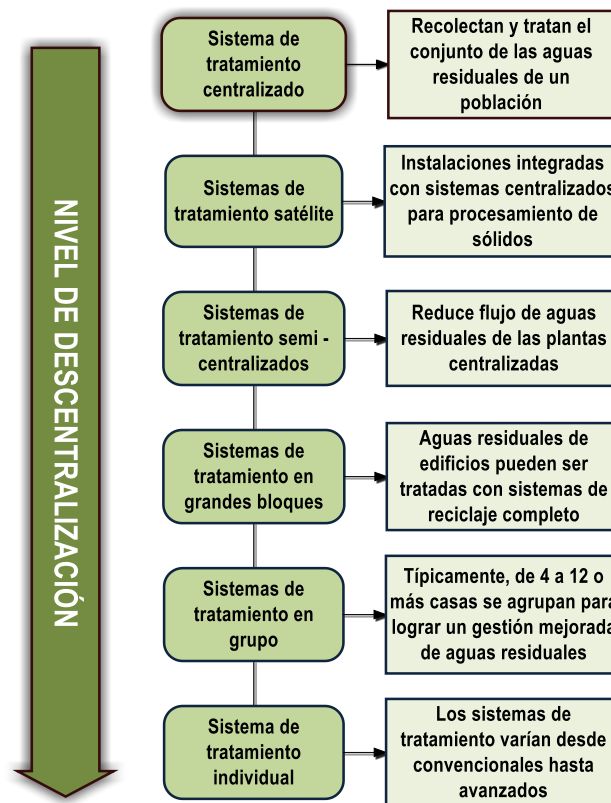


Figura 7.1. Niveles de tratamiento de la descentralización

Adaptado de (Libralato *et al.*, 2012)

**Sistemas de Tratamiento Satélite y Semi-Centralizados:** generalmente se ubican en las zonas más distantes del sistema de recolección de la planta de tratamiento centralizada, usualmente carecen de instalaciones para procesamiento de sólidos. Los sólidos generados en estas plantas son devueltos al sistema de recolección para ser procesados en la planta de tratamiento centralizada (Gikas y Tchobanoglous, 2009).

Pueden ser empleados para reducir los flujos de aguas residuales en las plantas centralizadas, o bien para eliminar o reducir el impacto en los cuerpos de agua receptores. Su fundamento es el reuso del agua residual y también potencializan la recuperación de energía (Ashley *et al.*, 2011; Cordell *et al.*, 2011; Cheng y Hu, 2010; Kothari *et al.*, 2011; Kothari *et al.*, 2010; Manara y Zabaniotou, 2012; Omer, 2008a,b).

**Sistemas de Tratamiento en Grandes Bloques:** se emplean en grandes edificaciones, como escuelas, centros comerciales y edificios, promoviendo el reuso del agua tratada en el lugar de generación. Generalmente, son considerados como sistemas de tratamiento satélite de tipo interceptor ya que interceptan estos efluentes residuales antes de llegar al sistema de recolección, tratando y reutilizando el agua en aplicaciones como descargas de inodoros y orinales, líquido

refrigerante en sistemas de refrigeración, jardinería, etc. Estos sistemas se conectan al alcantarillado urbano para enviar los sólidos producidos a tratamiento en la planta centralizada (Gikas y Tchobanoglous, 2009).

**Sistemas de Tratamiento en Grupo:** son sistemas satélites para el tratamiento de un grupo de viviendas o una urbanización suburbana, que se conectan al sistema de recolección urbano para el tratamiento de los sólidos generados. Libralato *et al.* (2012) indican que estos sistemas tratan los efluentes de grupos de residencias y el agua tratada se emplea para la recarga de las aguas subterráneas o irrigación.

**Sistemas de Tratamiento Individual o en sitio:** Es el nivel básico de descentralización, pero de igual importancia a las anteriores. Varían entre tecnologías de tratamiento convencionales a avanzadas y se encargan del tratamiento de una sola propiedad.

La Tabla 7.1 muestra una comparación entre un enfoque centralizados y uno descentralizados según los parámetros de mayor importancia en la implementación de un sistema de tratamiento de agua residual.

Tabla 7.1. Comparación entre esquemas centralizado y descentralizado

Parámetro	Centralizado	Descentralizado
Sistema de recolección	Diámetros grandes, largas distancias	Diámetros pequeños, cortas distancias
Requerimiento de espacio	Área grande en un solo sitio	Áreas pequeñas en distintos sitios
Operación y mantenimiento	Requerimiento de personal técnico a tiempo completo	Menor demanda, puede monitorearse de forma remota
Uniformidad del agua	Muchos tipos de agua	Agua más uniforme
Grado de dilución	Menor control sobre el agua lluvia, mayor dilución	Mayor control sobre el agua lluvia, mayor concentración
Riesgo	Riegos a mayor escala	Riegos distribuidos
Transferencia de agua	Incrementa la necesidad de transferencia de agua	El agua se reusa en el área de influencia
Control social	No hay control social	Mayor control social
Facilidad de expansión	Altos costos, mayor complejidad en su implementación	Bajos costos, menor complejidad en su implementación
Potencial de reuso	Toda el agua es concentrada en un punto	El agua puede ser reusada localmente

Fuente: CODESAB (2011)

### 7.1.2 Criterios de sostenibilidad en la descentralización del manejo del agua residual

Musiyarira *et al.* (2012) formulan once criterios de sostenibilidad sobre los cuales se fundamentan las decisiones del tipo de tratamiento y tecnología que deben implementarse para una localidad. Cabe destacar que los criterios de sostenibilidad que se presentan en la Tabla 7.2 son generales, y sirven como criterios comparativos entre tecnologías de tratamiento centralizadas y descentralizadas.

Tabla 7.2. Criterios de sostenibilidad para la descentralización del manejo del agua residual

Social	Criterios Técnicos	Ambiental
Aceptación	Rendimiento	Uso de recursos
Conocimiento	Confiabilidad	Impacto ambiental
Generación de Trabajo	Adaptabilidad	
Requerimientos institucionales	Facilidad de construcción	
Impacto en seguridad y salud		

Fuente: Musiyarira *et al.* (2012)

En general, una evaluación de sostenibilidad no se limita a un proceso, sino a la evaluación integrada de toda la cadena de procesos que proporcionan un servicio determinado. Desde esta perspectiva es posible comparar la variedad de soluciones integrales. Por ejemplo, para comparar los sistemas de tratamiento de agua residual en sitio y semi-centralizados se requiere la inclusión de los hogares con el fin de permitir la separación de los diferentes tipos de agua, para aplicar diferentes formas de saneamiento, y para usar y reutilizar diferentes fuentes de agua (Balkema *et al.*, 2002).

La selección de soluciones sostenibles se basa en la correcta escogencia de los aspectos de sostenibilidad. Una solución sostenible significa uso limitado y degradación limitada del recurso, al tiempo que se evita trasladar el problema en tiempo y espacio. Balkema *et al.* (2002) identifica los indicadores relevantes para la descentralización en el manejo del agua residual urbana consignados en la Tabla 7.3, a partir del cruce de la información recopilada de distintos autores que han trabajado en este tema.

Tabla 7.3. Indicadores para comparación de tecnologías descentralizadas de manejo del agua residual

Aspecto	Indicadores
Económico	Costo, Mano de obra
Tecnológico	Durabilidad, Facilidad de construcción/ tecnología sencilla, Soporta cargas de impacto/ efectos estacionales, Flexibilidad/ adaptabilidad, Mantenimiento, Confiabilidad/seguridad, Pequeña escala/en sitio/ Solución local
Socio-culturales	Conocimiento/participación, Competencias/ requerimientos de información, Aceptación cultural, Requerimientos institucionales, Desarrollo local, Responsabilidad
Ambiental	Acumulación, Biodiversidad/Fertilidad de suelo, Desección, Proyectar los problemas en tiempo y espacio, Extracción, Integración en ciclos naturales, Requerimiento de área, Olor/ruido/insectos/Afectación paisajística, Potencial de reuso, Agua, Nutrientes, Energía, Materia prima, Remoción de patógenos, Prevención de contaminación, Emisiones, DQO/DBO, Metales Pesados, Producción de lodos, Uso de químicos

Fuente: (Azar *et al.*, 1996; Bengtsson *et al.*, 1997; Butler y Parkinson, 1997; DTO, 1994; Emmerson *et al.*, 1995; ETC, 1996; Finnson y Peters, 1996; Hellström *et al.*, 2000; Icke y Aalderink, 1997; Jacobs *et al.*, 1996; Lundin *et al.*, 1999; Mels *et al.*, 1999; Niemczynowicz, 1994; Ødegaard, 1995; Otterpohl *et al.*, 1997)

### 7.1.3 Ventajas y desventajas de la descentralización del sistema de manejo del agua residual

Recientemente, se ha observado un aumento en el interés por la adopción de enfoques descentralizados en la gestión del recurso hídrico debido a los beneficios que evidencian estos sistemas a nivel global. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), los sistemas de manejo descentralizados son alternativas rentables a largo plazo que

cumplen con los objetivos de calidad de agua y salud pública (Parkinson y Tayler, 2003). Sin embargo, pueden presentarse limitantes que impidan la implementación de estos esquemas desde los aspectos económicos, institucionales tecnológico y social.

#### *Aspecto económico*

Se observan ciertas ventajas económicas en la implementación de sistemas descentralizados, ya que los costos de inversión en el tratamiento, construcción, operación y mantenimiento del sistema son menores que los de un sistema centralizado (Parkinson y Tayler, 2003). Al abordar el problema de la contaminación del agua lo más cerca del punto de generación, se economizan los costos de recolección y transporte del agua residual, que según varios autores oscilan entre el 60 y 90% del costo total de la implementación de un sistema de tratamiento de agua residual (Bakir, 2001; Libralato *et al.*, 2012; Massoud *et al.*, 2009; Maurer *et al.*, 2005; Otis, 1996).

Sin embargo, las agencias gubernamentales y departamentales de los países en desarrollo a menudo carecen de los recursos para invertir en nueva infraestructura y dependen del apoyo económico externo para financiar los recursos requeridos para implementar el sistema. Aunque las economías de escala tienden a aumentar los costos per cápita del servicio prestado por los sistemas descentralizados y la falta de acceso a créditos podría ser considerado como factor crítico que impida a las comunidades tener la capacidad de invertir en ellos, es probable que estos costos disminuyan cuando se implementen tecnologías no robustas o poco sofisticadas, permitiendo el acceso a este tipo de esquemas que fomentan la descentralización del agua urbana. (Parkinson y Tayler, 2003).

#### *Aspecto institucional*

En la mayoría de países, existe una falta de mecanismos institucionales adecuados para la gestión de esquemas descentralizados, además de la falta de un marco normativo que fomente la implementación de estos sistemas. Existe el peligro de que la descentralización conlleve a una fragmentación y al fracaso en la búsqueda de abordar los problemas globales adecuadamente. Sin un marco institucional formal que incluya los sistemas descentralizados, los esfuerzos dirigidos a su implementación continuarán siendo fragmentados y poco confiables. La descentralización requiere de una coordinación entre el gobierno, el sector privado y la sociedad para buscar los mecanismos institucionales apropiados para la gestión del sistema de manejo y el monitoreo y regulación de las organizaciones que se hacen cargo de su operación (Parkinson y Tayler, 2003).

#### *Aspecto tecnológico*

Si bien es conocido que el reuso del agua residual tratada se potencializa cuando se implementa un sistema de manejo descentralizado, teniendo en cuenta el contenido rico en nutrientes del agua residual que permite el aumento de la productividad agrícola, además de la viabilidad de reuso para acuicultura, riego de zonas verdes y recuperación de energía, existen algunos factores culturales

que podrían influenciar la percepción de la comunidad frente al reuso del agua residual. Adicionalmente, la opinión pública y de los responsables políticos hacia los riesgos percibidos en materia de salud pública, juegan un papel clave en la adopción de estos esquemas de manejo (Parkinson y Tayler, 2003).

Más aún, la falta de capacidades para la planeación, diseño, construcción y operación del sistema puede convertirse en una limitante para el funcionamiento del esquema. La operación sostenible de los sistemas de manejo del agua residual descentralizados debe ser compatible con los conocimientos y capacidades de la comunidad local (Parkinson y Tayler, 2003). Por ello, el reuso es una herramienta relevante para promover la iniciativa en la comunidad de participar en la operación y el mantenimiento del sistema descentralizado, ayudando a mantener su sostenibilidad financiera y operacional. Adicionalmente, contribuye al ahorro de agua mediante el reciclaje del agua residual tratada en actividades que no requieran pureza del recurso, lo cual resulta ventajoso en zonas donde la escasez de agua limita el uso del agua potable (Liang y van Dijk, 2011).

#### *Aspecto social*

El hecho de que no exista una demanda real para la implementación de esquemas descentralizados, a razón de que exista poca voluntad en pagar por los servicios brindados, puede considerarse una limitante determinante. Esto puede estar relacionado con la falta de conciencia ambiental y conocimiento de las implicaciones en salubridad de los sistemas (Parkinson y Tayler, 2003). Normalmente, lograr este cambio en la conciencia de las personas requiere de todo tipo de educación pública y publicidad.

En cambio, al implementar un sistema descentralizado se está cumpliendo con esta labor sin necesidad de invertir en educación ni publicidad. A través de los esquemas descentralizados, se contribuye a la educación de la conciencia de la comunidad con respecto al ahorro del agua y el reuso; adicionalmente, ayudan a construir una cultura nueva de la gestión del recurso (Anderson, 1996; Asano, 2005).

Para Daigger (2009) existen barreras para la implementación sistemas descentralizados que fomentan la gestión avanzada del agua urbana. En la Tabla 7.4 se muestran los factores que pueden potenciar o limitar la adopción de esquemas descentralizados.

Tabla 7.4. Análisis de fuerzas para la implementación de esquemas descentralizados

Fuerza de avance	Fuerza restrictiva
Escasez de agua	Iniciativa profesional de separar la gestión del agua urbana (agua lluvia, agua potable y agua residual)
Limitación del recurso	Limitaciones institucionales
Crecimiento poblacional	Practicas existentes
Disponibilidad de tecnología	Falta de aceptación pública
Demanda creciente	Procedimientos de evaluación económica

Fuente: Daigger (2009)

#### 7.1.4 Revisión de experiencias sobre descentralización en el manejo del agua residual

A fin de determinar los aspectos claves para la implementación de tecnologías descentralizadas de manejo del agua residual en las zonas urbanas de Colombia, se revisaron algunas de las experiencias a nivel global del uso de este tipo de estrategias y se analizaron que aspectos e indicadores de los anteriormente descritos se tomaron en cuenta para la selección adecuada de la tecnología que se adaptaba a las necesidades locales teniendo como marco de referencia la Gestión Integrada del Agua Urbana.

Algunas de las experiencias corresponden a ciudades donde se implementan enfoques de manejo descentralizados; otras relatan estudios detallados que demuestran la factibilidad de aplicación de estos sistemas en un contexto urbano, tales como los realizados por Jacobsen *et al.* (2013) que se centran en el continente africano o como el caso de Indiana, Estados Unidos analizado por Jones *et al.* (2001). La Tabla 7.5 muestra el compendio de las experiencias revisadas en la literatura en donde se implementan enfoques descentralizados.

Tabla 7.5. Experiencias sobre descentralización

Tipo de país	Experiencia	País	Población	Autor
País desarrollado	1. Tokio (a) y Fukuoka (b)	Japón	13,157,428 (a); 1,510,875 (b)	(Suzuki <i>et al.</i> , 2002)
	2. Christie Walk, Adelaida	Australia	1,262,940	(Mitchell, 2004)
	3. New Haven Village, Adelaida	Australia	1,262,940	(Mitchell, 2004)
	4. Rouse Hill, Sidney	Australia	4,627,345	(Mitchell, 2004)
	5. Homebush Bay, Sidney	Australia	4,627,345	(Mitchell, 2004)
	6. Inkerman Oasis, Melbourne	Australia	4,246,345	(Mitchell, 2004)
	7. Indiana	Estados Unidos		(Jones <i>et al.</i> , 2001)
País no desarrollado	8. Beijing	China	21,150,000	(Zhang, 2008)
	9. Xi'an	China	8,252,000	(Wang <i>et al.</i> , 2008)
	10. Ein Al Beida	Jordania	-	(Assayed, 2008)
	11. Zonas urbanas	Palestina	-	(Assayed, 2008)
	12. Tannoura	Líbano	-	(Assayed, 2008; Haddad <i>et al.</i> , 2008)
	13. Windhoek	Namibia	322,500	(Volkman, 2003)
	14. Surabaya	Indonesia	3,520,874	(Prihandrijanti <i>et al.</i> , 2008)
	15. Nairobi	Kenia	3,138,295	(Jacobsen <i>et al.</i> , 2013)
	16. Mbale	Uganda	91,800	Jacobsen <i>et al.</i> , (2013)
	17. Arua	Uganda	59,400	Jacobsen <i>et al.</i> , (2013)
	18. Cochabamba	Bolivia	630,587	(AGUATUYA, 2011); (ONU-Habitat, 2012)
	19. México D.F.	México	8,851,080	(Nanninga <i>et al.</i> , 2012)

Nota: Los espacios en blanco no especifican el tamaño de población

#### Potencial de reuso

Se identificaron 19 experiencias distribuidas por el mundo, en zonas urbanas, periurbanas y áreas de expansión de países tanto desarrollados como no desarrollados. La revisión de literatura permitió

establecer el potencial de reuso de la tecnología como indicador clave en la selección de un sistema de manejo descentralizado, siendo un factor común en cada experiencia analizada.

Entre los tipos de reuso existentes, se destacó el reuso paisajístico/urbanístico presente en el 74% de las experiencias. Se evidenciaron varios tipos de propósitos para reuso, como por ejemplo la descarga de inodoros en Beijing, Namibia, Tokio, Fukuoka, Uganda e Indiana, jardinería en Beijing, Xi'an y Surabaya, lavado de calles en Xi'an, Tokio y Fukuoka, y riego urbano en Xi'an, Namibia, Tokio, Fukuoka, Cochabamba y México D.F. Existen casos donde se evidenciaron avances importantes en el tema de descentralización como son los de Australia (Adelaida, Sídney, Melbourne) en donde se reutiliza el agua tratada para todas las actividades consideradas anteriormente, y adicionalmente la emplean para lavado de autos (AGUATUYA, 2011; Jacobsen *et al.*, 2013; Jones *et al.*, 2001; Mitchell, 2004; Nanninga *et al.*, 2012; ONU-Habitat, 2012; Prihandrijanti *et al.*, 2008; Suzuki *et al.*, 2002; Volkman, 2003; Wang *et al.*, 2008; Zhang, 2008).

Así mismo, el reuso también se aplicó en actividades como agricultura, acuicultura y recarga de acuíferos. Particularmente en regiones donde se presenta escasez del recurso hídrico se evidenció con mayor frecuencia el reuso para agricultura y recarga de agua subterránea, por ejemplo, la zonas áridas de Jordania, Palestina, Líbano, Uganda y Namibia, o como Beijing, Tokio y Fukuoka donde la tasa de crecimiento poblacional va en aumento y el cubrimiento de la demanda de agua es cada vez más difícil de satisfacer (Assayed, 2008; Jacobsen *et al.*, 2013; Suzuki *et al.*, 2002; Volkman, 2003; Zhang, 2008). Otras regiones efectúan estas actividades para el bien comunitario al proveer de frutas y vegetales a sus habitantes al tiempo que se reduce la demanda de agua, como ocurre en Adelaida, Australia en donde se ha ideado un huerto comunitario del cual toda la comunidad de Christie Walk se beneficia. Esta situación se repite en otro sector de Adelaida llamado New Haven Village (Mitchell, 2004).

#### *Factibilidad económica y Apoyo institucional y político*

Dos de los indicadores económicos de mayor influencia en la implementación de sistemas descentralizados son la factibilidad económica y el apoyo institucional y político. Las experiencias asignaron un papel clave a los tomadores de decisión (entidades públicas y privadas) en estos proyectos, siendo los principales responsables de una correcta planeación de cualquier proyecto en saneamiento. Beijing y Xi'an contaron con la asistencia gubernamental para establecer una gestión del recurso hídrico apropiada a través de tecnologías descentralizadas. En otros escenarios como, Ein Al Beida, Palestina, Tannoura y Christie Walk en Australia se tuvo el apoyo de agencias nacionales e internacionales que financiaron los proyectos llevados a cabo en cada lugar. Adicionalmente, experiencias como las africanas y las de Indiana y Cochabamba evidenciaron la importancia que tiene este indicador para la ejecución de este tipo de proyectos.



Con respecto a la factibilidad económica, se logró ver en algunos casos la viabilidad de un enfoque descentralizado comparado con uno centralizado, reportando menores gastos y mayores beneficios. Uno de estos casos es el revisado por Prihandrijanti *et al.* (2008) quienes después de analizar los costos de implementación de un tratamiento centralizado contra uno descentralizado en Surabaya, Indonesia, concluyeron que este último es más factible ya que tiene un Valor Presente Neto<sup>1</sup> más alto y una Relación Costo/Beneficio<sup>2</sup> más baja que el otro.

Wang *et al.* (2008) abordaron este indicador desde otra óptica, en Xi'an son 3 las PTAR centralizadas que prestan el servicio de recolección y tratamiento del agua residual doméstica e industrial de la ciudad y otras 2 estaban proyectas a entrar en operación en 2010. Ellas producen efluentes que se reciclan en las residencias para cubrir el 40% de la demanda de agua de la ciudad; sin embargo, la capacidad de las plantas estaba llegando a su límite y fue necesario recurrir a otras alternativas de reuso que resultaran convenientes para la ciudad, teniendo en cuenta que las áreas de expansión estaban ubicadas en zonas distantes al núcleo urbano y la ampliación del sistema de alcantarillado y de tuberías de reciclaje suponían costos elevados.

Wang *et al.* (2008) propusieron una metodología de selección de tecnología introduciendo el concepto de distancia crítica, que considera la distancia existente entre la nueva urbanización y el punto de acople más cercano a la tubería de suministro de agua reciclada (L). Hay que recalcar que usualmente los diámetros de tubería requeridos para el transporte del agua residual en Xi'an no son comerciales y requieren de su fabricación lo que aumenta los costos. Así, el costo de implementación de un enfoque centralizado depende del caudal (Q) que corresponde a la demanda del sitio y de la distancia crítica. Por otro lado, si se opta por un esquema descentralizado el costo de su implementación dependerá del Q únicamente. Así, a un Q determinado, existe una distancia ( $L_0$ ) a la que el costo de la construcción de la tubería iguala al de la construcción del sistema descentralizado.  $L_0$  puede ser llamado distancia crítica. Si  $L < L_0$ , entonces es económicamente factible el uso de agua reciclada de la PTAR centralizada, y si  $L > L_0$ , entonces la construcción de una PTAR descentralizada es más viable.

### Localización

Con respecto a la localización se determinaron las áreas urbanas, periurbanas y de expansión como zonas de potencial aplicabilidad de enfoques descentralizados, implementados en las áreas periurbanas con mayor frecuencia. Esto se debe a que en la mayoría de los casos el núcleo urbano es muy denso y no dispone de espacio para la ubicación de una planta descentralizada, o ya

---

<sup>1</sup> Valor Presente Neto: es una medida del beneficio que rinde un proyecto de inversión a través de toda su vida útil (URL-5).

<sup>2</sup> Relación Costo/Beneficio: toma los ingresos y egresos presentes netos del estado de resultado, para determinar cuáles son los beneficios por cada peso que se sacrifica en el proyecto (URL-6).

cuentan con un sistema de manejo y reuso desde una instalación centralizada como en Xi'an (Wang *et al.*, 2008). Adicionalmente, en las grandes urbes las zonas periurbanas se encontraban muy aisladas del núcleo urbano y del sistema de manejo del agua residual que dispone la ciudad, como en Sidney, Cochabamba y Xochimilco (AGUATUYA, 2011; Mitchell, 2004; Nanninga *et al.*, 2012; ONU-Habitat, 2012). Aun así, existen casos donde se han empleado esquemas descentralizados en zonas urbanas, particularmente en edificaciones como sucede en Tokio y Fukuoka donde cerca de 2,100 edificios contaban con un sistema de tratamiento en sitio o estaban conectados a una PTAR descentralizada hacia 1996 (Suzuki *et al.*, 2002).

### *Participación comunitaria*

Un indicador que sobresalió es la participación comunitaria siendo fundamental en todas las fases de un proyecto en saneamiento. El 68% de las experiencias lo consideraron como fundamental a fin de que se obtenga una apropiación de la tecnología al final del proyecto. Casos como el descrito por Assayed (2008) y Haddad *et al.* (2008) en el cual 30 hogares de Tannoura, Líbano se beneficiaron de una tecnología en sitio que trata el agua para reuso en riego de cultivos familiares. La experiencia muestra que a través de un proceso participativo las mujeres se empoderaron y fueron capaces de tomar decisiones propias a partir del conocimiento adquirido en los talleres. También, se observó un proceso participativo en el sector de Lomas del Pagador, Cochabamba, cuyos habitantes han creado un comité de agua que con el apoyo técnico de AGUATUYA, se hace cargo de la operación y mantenimiento de la instalación descentralizada de la zona (AGUATUYA, 2011; ONU-Habitat, 2012).

### *Conciencia Ambiental*

Adicional a la participación, el éxito en la implementación de esquemas descentralizados depende de la conciencia ambiental de las autoridades. En ocasiones, la falta de comprensión del enfoque de la GIAU y de los beneficios ambientales que reportan los esquemas descentralizados impidieron que fueran tenidos en cuenta o que se descartaran por los tradicionales; hay casos donde primaron los intereses políticos y económicos. Como lo muestra la Tabla 7.6, fueron varios los autores que hicieron referencia a este indicador, convirtiéndolo importante para el estudio.

### *Uso y demanda de agua*

Los usos y la demanda de agua demostraron ser indicadores de consideración para el estudio, pues se le prestó mucha atención en los artículos revisados con base en la Tabla 7.6. La mayoría de las experiencias mostraron que la demanda de agua tiende a aumentar en función del tiempo, a medida que la población y las actividades industriales, agrícolas y comerciales se extienden en las ciudades. En zonas áridas como Xi'an, Ein Al Beida, Kenia y Arua se agrava esta situación, a causa de la limitada disponibilidad hídrica y el acelerado crecimiento poblacional que experimentan (Assayed, 2008; Jacobsen *et al.*, 2013).

En Xi'an se observaron casos muy particulares con las llamadas "urbanizaciones verdes", que son proyectos urbanísticos que buscan mejorar la calidad y condiciones de vida en las áreas de expansión de la ciudad siendo amigables con el medio ambiente. Actualmente ya existen este tipo de urbanizaciones que están obligadas por ley a tener un área verde mayor al 35% del área total del terreno. Sin el sistema de reuso con el que cuenta la ciudad, resultaría una tarea insostenible el mantenimiento de estas urbanizaciones debido a las grandes cantidades de agua que se requiere para riego (Wang *et al.*, 2008).

#### *Tamaño y Densidad poblacional*

Otros de los indicadores que se tomaron en cuenta para la selección de tecnologías descentralizadas son los relacionados con la población, a saber el tamaño y la densidad existente y futura de la ciudad. Son factores comunes en 68% de las experiencias analizadas, y se relacionan estrechamente uno con otro. De la revisión se pudo apreciar que la tasa de crecimiento poblacional fue importante al momento de evaluar un esquema centralizado contra uno descentralizado, pues a medida que la población aumenta se hace más complicado su abastecimiento de agua para actividades diarias y se hace necesario la inclusión de nuevas fuentes de suministro, sin mencionar el aumento en los costos de construcción y ampliación del alcantarillado o de las instalaciones centralizadas para tratar el agua residual (Zhang, 2008).

#### *Conservación de los recursos*

En general, la literatura evidenció que muchos de los esfuerzos efectuados en el tema de descentralización de los sistemas de tratamiento tienen un mismo fin, la conservación de los recursos naturales. Es un indicador se presentó en el 84% de las experiencias y se refiere a la protección del medio ambiente mediante acciones que busquen disminuir el impacto que ejercen sobre él las actividades humanas. De esta forma, al implementar tecnologías amigables con el ambiente se cumple con uno de los objetivos de un tratamiento de agua, devolver el recurso con la menor afectación posible al medio. Mitchell (2004) menciona en una de sus experiencias que la adopción del enfoque descentralizado de Rouse Hill, Sídney ha sido influenciado principalmente por la protección y conservación de los recursos, ya que anteriormente se vertía el agua tratada en el río Hawkesbury-Nepean que desemboca en un estuario, un área de alto valor ecológico.

#### *Disponibilidad de agua*

La disponibilidad de agua demostró ser fundamental al momento de seleccionar una tecnología de tratamiento. Son varios los autores que lo mencionaron, principalmente en las regiones áridas de Jordania, África y Japón. Son lugares donde la escasa disponibilidad de agua obligó a las ciudades a recurrir a nuevas fuentes de abastecimiento de agua sostenibles, tales como el agua residual tratada

en instalaciones descentralizadas que resultan económicamente factibles y que facilitan la conservación de los recursos.

#### *Otros indicadores identificados*

La revisión permitió identificar otros indicadores, que si bien no son tan comunes entre las experiencias, tienen igual validez que los anteriores. Entre ellos, se encuentran los costos de operación y mantenimiento, el nivel de descentralización, la planeación urbana, la aceptación de la tecnología y del reuso, la apropiación de la tecnología, el uso del suelo, el impacto en seguridad y salud pública, la precipitación y el reciclaje de nutrientes. Otros indicadores como la eficiencia tecnológica, las políticas gubernamentales y regulaciones existentes, los requerimientos institucionales, la distribución poblacional y la remoción de patógenos fueron citados por los autores en sus artículos. Existen otros que fueron citados menor cantidad de veces y se han adjuntado en la Tabla 7.6 junto a los demás indicadores analizados en esta sección.

## **7.2 IDENTIFICACIÓN DE ASPECTOS CLAVES PARA LA DESCENTRALIZACIÓN EN EL MANEJO DEL AGUA RESIDUAL**

Los indicadores identificados en la revisión del estado del arte y experiencias incluyen tanto el sistema de tratamiento como el de recolección y transporte (alcantarillado). En la Tabla 7.6 se recopilaron los aspectos, variables e indicadores, resaltando en rojo aquellos indicadores que estuvieron presentes en al menos el 50% de las experiencias analizadas, es decir, que se mencionen en mínimo 9 de las 19 experiencias que se revisaron.

Así, se obtuvieron 14 indicadores relevantes distribuidos entre los aspectos económico, tecnológico, social y ambiental. La Tabla 7.7 explica el alcance de cada indicador tomado en cuenta. La mayoría de los indicadores contenidos en la tabla pueden aplicar tanto para tratamiento centralizado como descentralizado. Sin embargo, la importancia de cada uno varía dependiendo del esquema que se implemente.

Tabla 7.6. Indicadores identificados en la revisión del estado del arte sobre esquemas de tratamiento descentralizados

ASPECTOS	VARIABLES	INDICADORES	AUTORES																	TOTAL			
			1	2	3			4	5	6					7	8			9		10	11	
					3 <sub>1</sub>	3 <sub>2</sub>	3 <sub>3</sub>			6 <sub>1</sub>	6 <sub>2</sub>	6 <sub>3</sub>	6 <sub>4</sub>	6 <sub>5</sub>		8 <sub>1</sub>	8 <sub>2</sub>	8 <sub>3</sub>					
Económico e institucionales	Costos	• Inversión		X											X				X		X	4	
		• Factibilidad	X	X				X		X	X			X	X	X		X			X	10	
		• Operación y mantenimiento										X	X	X	X			X		X	X	7	
		• Manejo de residuos													X							1	
	Recursos económicos	• Disponibilidad de capital							X						X		X				X	4	
		• Apoyo institucional y político	X	X	X	X	X		X	X		X		X		X	X	X	X	X		X	14
		• Capacidad y disponibilidad de pago								X					X	X	X			X	X	6	
Tecnológico	Características tecnológicas	• Eficiencia			X	X						X	X	X		X	X		X	X		9	
		• Confiabilidad						X								X					X	3	
		• Facilidad de construcción			X														X			2	
		• Robustez de Tecnología	X						X												X	3	
		• Durabilidad																			X	1	
		• Requerimiento energético	X												X		X	X		X	X	6	
		• Nivel de tratamiento	X	X					X			X										4	
		• Potencial de reuso	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	18	
	Características de la zona	• Requerimiento y disponibilidad de área					X		X												X	3	
		• Estándares de descarga y control							X			X							X		X	4	
		• Adaptabilidad/Flexibilidad					X								X			X			X	4	
		• Nivel de descentralización				X			X						X	X	X	X			X	7	
		• Topografía																X	X	X	X	4	
	Tipo de reuso	• Agricultura	X		X	X	X		X	X	X											7	
		• Acuicultura									X											1	
		• Paisajísticos/urbanísticos	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	14	
		• Recarga de agua subterráneas	X					X			X						X	X				5	

Fuente: 1. (Zhang, 2008); 2. (Wang *et al.*, 2008); 3. (1. Jordania; 2. Palestina; 3. Libano) (Assayed, 2008); 4. (Volkman, 2003); 5. (Suzuki *et al.*, 2002); 6. (1. Christie Walk; 2. New Haven Village; 3. Rouse Hill; 4. Homebush Bay; 5. Inkerman Oasis) (Mitchell, 2004); 7. (Prihandrijanti *et al.*, 2008); 8. (1. Kenia; 2. Mbale; 3. Arua) (Jacobsen *et al.*, 2013); 9. (AGUATUYA, 2011; ONU-Habitat, 2012); 10. (Nanninga *et al.*, 2012); 11. (Jones *et al.*, 2001)

Tabla 7.6. Indicadores identificados en la revisión del estado del arte sobre esquemas de tratamiento descentralizados (continuación)

ASPECTOS	VARIABLES	INDICADORES	AUTORES																	TOTAL			
			1	2	3			4	5	6					7	8			9		10	11	
					3 <sub>1</sub>	3 <sub>2</sub>	3 <sub>3</sub>			6 <sub>1</sub>	6 <sub>2</sub>	6 <sub>3</sub>	6 <sub>4</sub>	6 <sub>5</sub>		8 <sub>1</sub>	8 <sub>2</sub>	8 <sub>3</sub>					
Social	Situación local (ciudad)	• Políticas gubernamentales y regulaciones		X			X		X			X		X		X	X	X			X	9	
		• Planeación urbana		X								X				X	X	X		X	X	7	
		• Requerimientos institucionales							X	X	X		X		X	X	X			X	8		
		• Localización (Periurbano, urbano, áreas de expansión)		X	X				X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	13	
	Comunidad	• Aceptación de tecnología			X		X			X	X									X	X	X	7
		• Aceptación de reuso			X	X	X			X	X					X				X			7
		• Generación de empleo			X		X							X	X							X	5
		• Participación			X		X			X		X	X		X		X	X	X	X	X	X	11
		• Apropiación de la Tecnología					X			X		X			X		X		X		X	7	
		• Conciencia ambiental		X			X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X	13	
		• Desarrollo local	X							X	X											3	
		• Usos y demanda de agua	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X		X		X	X	X		15	
		• Usos del suelo	X	X	X	X	X		X												X	7	
	Población	• Impacto en seguridad y salud pública	X												X		X	X	X	X	X	7	
		• Tamaño de población	X	X	X			X	X			X			X	X	X	X	X	X		12	
		• Densidad poblacional	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X					X	13	
		• Distribución poblacional		X					X	X	X	X	X	X		X						8	
Ambiental	Características ambientales	• Precipitación		X	X		X	X	X						X	X					7		
		• Temperatura		X	X		X	X								X					5		
		• Balance hídrico	X	X			X					X				X	X				6		
		• Áreas sensitivas										X							X		2		
		• Agua subterránea	X					X								X	X		X	X	6		
	Impacto ambiental	• Conservación de recursos	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	16	
		• Reciclaje de nutrientes	X		X							X	X	X	X					X		7	
		• Remoción de patógenos y contaminantes	X			X			X			X			X		X		X	X		8	
		• Disponibilidad de agua	X	X	X		X	X	X						X	X	X	X		X		11	
		• Producción de lodos								X			X		X							3	
		• Olor/ruido/insectos/afectación paisajística																	X			1	

Fuente: 1. (Zhang, 2008); 2. (Wang *et al.*, 2008); 3. (1. Jordania; 2. Palestina; 3. Líbano) (Assayed, 2008); 4. (Volkman, 2003); 5. (Suzuki *et al.*, 2002); 6. (1. Christie Walk; 2. New Haven Village; 3. Rouse Hill; 4. Homebush Bay; 5. Inkerman Oasis) (Mitchell, 2004); 7. (Prihandrijanti *et al.*, 2008); 8. (1. Kenia; 2. Mbale; 3. Arua) (Jacobsen *et al.*, 2013); 9. (AGUATUYA, 2011; ONU-Habitat, 2012); 10. (Nanninga *et al.*, 2012); 11. (Jones *et al.*, 2001)

Tabla 7.7. Definición y alcance de indicadores de descentralización identificados en la revisión del estado del arte

Variable	Indicador	Alcance
Costos	Inversión	Cubrimiento de los costos desde la fase de planeación hasta la ejecución del proyecto (materiales de obra, herramienta y equipos, mano de obra, Administración, Imprevistos, Utilidad). Incluye costo del terreno.
	Factibilidad	Disponibilidad de capital de financiamiento necesario para invertir en el desarrollo del proyecto, que deberá haber probado que sus beneficios a obtener son superiores a sus costos en que incurrirá al desarrollar e implementar el proyecto o sistema.
	Operación y mantenimiento	Actividades encaminadas al buen funcionamiento del sistema y a su óptima operación. Algunos de los elementos y factores requeridos para lograrlo son energía eléctrica, insumos químicos, control y proceso de calidad de agua, personal capacitado para la O&M (Operación y mantenimiento). Dentro de este indicador se incluyen los costos de administración.
	Manejo de residuos	Manejo seguro de lodos y gases generados en el proceso de tratamiento de agua residual.
Recursos económicos	Disponibilidad de capital	Capacidad de cubrir los gastos de inversión, administración, O&M del proyecto.
	Apoyo institucional y político	Soporte de entidades ambientales y políticas a nivel local, regional, nacional o internacional.
	Capacidad y disponibilidad de pago	Capacidad/posibilidad de que la comunidad pueda costear los componentes del sistema de tratamiento descentralizado, así como su O&M.
Características tecnológicas	Eficiencia	Porcentaje de remoción de contaminantes de acuerdo al nivel de tratamiento del sistema descentralizado.
	Confiabilidad	Resistencia a cargas choque de material orgánico y tóxico, asociado a la posibilidad de proveer el efluente requerido.
	Facilidad de construcción	Asociada a la complejidad tecnológica, relacionado con los requerimientos de insumos, materiales y mano de obra calificada.
	Robustez de Tecnología	Vulnerabilidad frente a cambios en el caudal y calidad del afluente.
	Durabilidad	Periodo de funcionamiento óptimo del sistema de alcantarillado y/o tratamiento en el horizonte del proyecto.
	Requerimiento energético	Usualmente asociado a sistemas de bombeo, requerido para la operación del sistema de alcantarillado y/o tratamiento
	Nivel de tratamiento	Primario, secundario, terciario o avanzado según los objetivos de calidad del cuerpo receptor.
	Potencial de reuso	Posibilidad de reutilización del agua tratada para un uso específico.
Características de la zona	Requerimiento y disponibilidad de área	Área de terreno requerido por la tecnología vs área disponible para implementarla.
	Estándares de descarga y control	Concentración de los contaminantes de las descargas que puedan impactar el cuerpo receptor definidos en la reglamentación.
	Adaptabilidad/Flexibilidad	Capacidad del sistema descentralizado de proveer el rendimiento y confiabilidad solicitada en la zona donde se implemente.
	Nivel de descentralización	Puede ser tratamiento en sitio, descentralizado o centralizado.
	Topografía	Se asocia principalmente a la pendiente de terreno donde se implementará la tecnología de tratamiento.

Tabla 7.7. Definición y alcance de indicadores de descentralización identificados en la revisión del estado del arte (continuación)

Variable	Indicador	Alcance
Tipo de reuso	Reuso en Agricultura	Reutilización del agua residual tratada en actividades agrícolas. Aplica para riego restringido como no restringido.
	Reuso en Acuicultura	Uso del agua residual tratada en actividades de crianza de especies acuáticas vegetales y animales.
	Reuso Paisajísticos/urbanísticos	Riego de parques y zonas verdes, lavado de calles con agua residual tratada.
	Recarga de agua subterráneas	Descarga de agua tratada en acuíferos.
Situación local (ciudad)	Políticas gubernamentales y regulaciones	Normatividad y regulaciones a considerar para la toma de decisiones.
	Planeación urbana	Lo que refiere al ordenamiento del territorio urbanístico, a fin de conocer hacia donde crece la ciudad. Así conocer las áreas con potencial de aplicación de un enfoque de tratamiento descentralizado del agua residual.
	Requerimientos institucionales	Necesidad de apoyo de entidades públicas y privadas en todas las fases del proyecto, desde su planeación hasta su ejecución y operación.
	Localización (Periurbano, urbano, áreas de expansión)	Diferentes áreas incluidas en la planificación urbana con potencial aplicación de esquemas descentralizados.
Comunidad	Aceptación de tecnología	Aprobación de la comunidad de la tecnología a implementar.
	Aceptación de reuso	Aprobación de la comunidad a los tipos de reuso que se le den al agua tratada en la zona de influencia del proyecto.
	Generación de empleo	Inclusión de la misma comunidad en la construcción, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento y/o alcantarillado.
	Participación	Inclusión de la comunidad en todas las fases del proyecto, como actores decisorios a la hora de seleccionar el esquema de manejo del agua residual (alcantarillados más tratamiento de agua residual).
	Apropiación de la Tecnología	Se logra a partir de un procedimiento de participación bien ejecutado, cultivando el sentido de pertenencia frente a la tecnología y la responsabilidad para que funcione adecuadamente.
	Conciencia ambiental	La conservación del medio ambiente y la mejora de su estado por parte de los usuarios.
	Desarrollo local	Presencia de condiciones adecuadas para la implementación del sistema descentralizado, relacionado con la disponibilidad de materiales, de mano de obra calificada, capacidades para la planeación, diseño, construcción y operación del sistema.
	Usos y demanda de agua	Cantidad de agua potable requerida por la comunidad para el desarrollo de las actividades doméstica y/o industriales
	Usos del suelo	Tipo de actividades que se efectúan en las áreas de terreno de la localidad (cultivos, parques, zonas verdes, etc.).
	Impacto en seguridad y salud pública	Factores de riesgo asociados a la contracción de enfermedades
Población	Tamaño de población	Cantidad de personas que se benefician del sistema descentralizado. Incluye tasas de crecimiento y proyección de población.
	Densidad poblacional	Es el número de habitantes por área de terreno.
	Distribución poblacional	Es una medida del grado de concentración urbana y se refiere a la forma en que los habitantes se reparten sobre el terreno.



Tabla 7.7. Definición y alcance de indicadores de descentralización identificados en la revisión del estado del arte (continuación)

Variable	Indicador	Alcance
Características ambientales	Precipitación	Asociado con número de eventos de lluvia que se presentan anualmente en determinada zona. Ello para determinar si se trata de una zona árida o tropical, lo cual se relaciona con el tipo de alternativa tecnológica y el potencial de reuso.
	Temperatura	Propiedad de la materia que se relaciona con la sensación de calor o frío que se sienta al estar en contacto con ella. Se asocia con el tipo de clima predominante de la zona que define el tipo alternativa tecnológica a implementar.
	Balance hídrico	Cantidad de agua disponible a partir de las fuentes existentes y su calidad de agua, asociado también a la capacidad de dilución del cuerpo receptor.
	Áreas sensitivas	Presencia de zonas de valor ecológico protegidas por instituciones ambientales, susceptibles de cualquier cambio en su entono.
	Agua subterránea	En lo que refiere al uso como fuente de abastecimiento para la ciudad y consideradas por el riesgo de contaminación por agua residual.
Impacto ambiental	Conservación de recursos	La necesidad de reducir el impacto ambiental lo mayor posible.
	Reciclaje de nutrientes	Aprovechamiento de nutrientes del agua residual tratada en producción agrícola.
	Remoción de patógenos y contaminantes	Reducción de la carga contaminante, tanto físico-química como microbiológica en las descargas al cuerpo receptor.
	Disponibilidad de agua	Presencia de fuentes de agua adecuadas para consumo humano.
	Producción de lodos	Este indicador se asocia al tipo de tecnología que se implemente, y la cantidad de lodo producidos en el tratamiento los cuales requieren de un adecuado manejo y disposición.
	Olor/ruido/insectos/afectación paisajística	Impactos que se generan en la salud y el bienestar de la comunidad.

Los indicadores identificados a partir de la revisión del estado del arte y experiencias que mayor importancia evidenciaron según la Tabla 7.6, se evaluaron para determinar cuáles de ellos deben tenerse en cuenta en la implementación de esquemas descentralizados en zonas urbanas de Colombia. La sección 7.3 a continuación muestra los resultados obtenidos en este sentido que corresponde al desarrollo del objetivo 3.

## 7.3 ASPECTOS CLAVES PARA LA DESCENTRALIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN COLOMBIA

### 7.3.1 Definición de los aspectos

Con el objetivo de priorizar los indicadores identificados a partir de la revisión de experiencias y estado del arte en el contexto local, se elaboró una encuesta estructurada para la evaluación de expertos (académicos, consultores, autoridad ambiental y empresas de servicios públicos) relacionados con el manejo del agua residual urbana. Es importante recalcar que los indicadores determinados en la revisión de experiencias son aplicables tanto en esquemas descentralizados como centralizados; el propósito de la encuesta radica en la priorización que cada uno de estos tiene para la implementación de tratamiento descentralizado del agua residual.

En primera instancia, se dio prioridad a los indicadores mencionados por mayor número de autores en la revisión del estado del arte y experiencias, es decir, aquellos que estuvieron presentes en al menos el 50% de las experiencias. Mediante un proceso de selección preliminar en el que se han consultado a expertos de diversos sectores relacionados con el tema del manejo del agua residual en Colombia, se descartaron, incluyeron y ajustaron aquellos indicadores que, teniendo en cuenta la opinión de ellos, lo requerían a fin de representar las condiciones locales. De esta forma, se construyó la encuesta (Anexo 1) diligenciada por un total de 35 profesionales entre los meses de Febrero y Marzo de 2014. En la Figura 7.2 se muestran los grupos y la proporción de expertos encuestados.

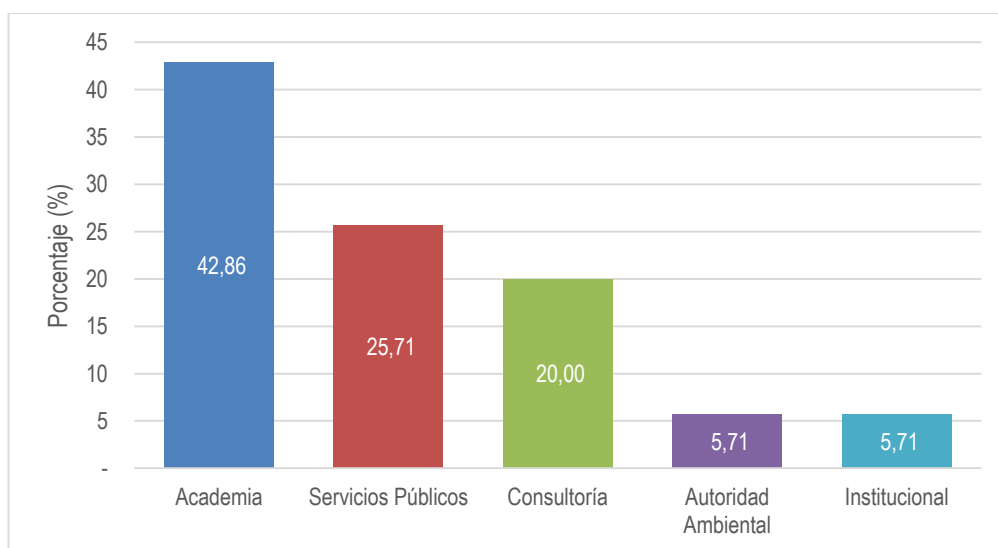


Figura 7.2. Grupos de expertos participantes en la encuesta de priorización de indicadores de descentralización

Se pudo ver la poca participación por parte de los sectores de autoridad ambiental e institucional en la encuesta, debido a la dificultad de acceso a dichas entidades, el limitado tiempo y la falta de interés de los expertos en ciertos casos hacia el diligenciamiento de ella. En contraste, el sector académico evidenció la mayor cantidad de encuestados siendo más del 40% de los participantes de la encuesta, al considerar que toda la muestra recogida provino de la Universidad del Valle lo que facilitó la colaboración de los expertos. En la Tabla 7.8 se observan la cantidad de expertos que participaron en la encuesta junto con los nombres de las entidades en las cuales desempeñan sus actividades.

Tabla 7.8. Participantes de la encuesta de priorización de indicadores de descentralización

Sectores participantes	Nombres	Número de participantes
Consultorías	Mediciones Ambientales Medisam Ltda.	2
	DBO Ingeniería	3
	Asesores y Consultores Ambientales A.C.A S.A.S	1
	Independiente	1
Academia	Universidad del Valle	15
Servicios públicos	EMCALI	9
Autoridad ambiental	CVC	2
Instituciones	Gobernación del Valle	2
<b>Total</b>		35

La encuesta mantiene los mismos 4 aspectos económico e institucional, tecnológico, social y ambiental considerados en la revisión de experiencias. La Tabla 7.9 presenta y define las variables e indicadores que se tuvieron en cuenta en la encuesta, considerando aquellos que evidenciaron una mayor relevancia en la revisión de experiencias y ajustándolos al contexto local colombiano.

Tabla 7.9. Presentación y definición de variables e indicadores de la encuesta sobre descentralización

Variable	Definición de la variable	Indicadores
Costos	Relacionado con el costo real de implementación de un sistema de manejo de agua residual que comprende la construcción y ejecución de la tecnología y el costo de construcción y ampliación de las redes de alcantarillado urbano, situación que en algunos casos podría favorecer la descentralización teniendo en cuenta los altos costos que genera esta última actividad.	Inversión en el sistema de tratamiento
		Operación y mantenimiento del sistema de tratamiento
		Inversión en el sistema de alcantarillado
		Operación y mantenimiento del sistema de alcantarillado
Planeación	Se relaciona con la existencia de zonas de potencial uso de esquemas descentralizados en Colombia como son las zonas periurbanas, áreas de expansión y zonas urbanas que no tengan tratamiento de agua residual, así como la influencia y apoyo existente por parte de las instituciones y empresas de servicios públicos.	Apoyo institucional para esquemas descentralizados
		Interés de empresas de servicios en la administración, O&M
		Existencia de zonas periurbanas y de expansión sin cobertura en tratamiento de agua residual

Tabla 7.9. Presentación y definición de variables e indicadores de la encuesta sobre descentralización (continuación)

Variable	Definición de la variable	Indicadores
Características tecnológicas	Se tiene en cuenta el potencial de reuso al ser considerado en el 100% de las experiencias revisadas; también se incluye el nivel de descentralización, que incide en la complejidad tecnológica y de construcción. Adicionalmente, la cobertura del alcantarillado hace referencia a la cantidad de usuarios que se conectarán al nuevo sistema de tratamiento, lo que afecta directamente el nivel de descentralización y la complejidad del mismo.	Potencial de reuso
		Cobertura en alcantarillado
		Nivel de descentralización
Características de la zona	Se considera la disponibilidad de área que en ocasiones limita el tipo de tecnología a implementar, sobre todo en zonas urbana donde hay poca disponibilidad de terreno para la ejecución de un proyecto de este tipo. Con respecto a topografía, se hace referencia principalmente a las pendientes de la zona, debido a la complejidad de construcción en zonas escarpadas o montañosas. Igualmente, cuando por topografía no es posible brindar cobertura en alcantarillado, se potencializa un sistema descentralizado. También se hace referencia a los estándares de calidad en el punto de descarga como parámetro de referencia al seleccionar la tecnología que cumpla con el nivel aceptable por la normatividad colombiana. Adicionalmente, se tiene en cuenta la distancia al punto de descarga considerada por Wang <i>et al.</i> (2008).	Disponibilidad de área
		Objetivos de calidad
		Distancia al punto de descarga
		Topografía de la zona
Tipo de reuso	Se tienen en cuenta todas aquellas formas de reuso del agua tratada consideradas en la literatura, a saber uso para riego en agricultura, acuicultura, paisajístico-urbanístico y recuperación de energía. La recarga de acuíferos no resulta viable localmente, pues según el Artículo 27 del Decreto 3930 de 2010 de la reinyección de residuos líquidos que menciona que solo se permite este tipo de actividad con agua proveniente de la exploración y explotación petrolífera, de gas y de recursos geotérmicos, siempre y cuando no se impida el uso actual o potencial del acuífero (MAVDT, 2010a).	Agricultura
		Acuicultura
		Urbanístico (riego de parques y zonas verdes) lavado de calles
		Recuperación de energía
Comunidad	La aceptación de un esquema descentralizado es relevante considerando el potencial de los sistemas de manejo descentralizados para desarrollar el reuso; de ello depende que sea posible implementar un tratamiento que permita el reciclaje del agua tratada para los distintos usos. De igual importancia resulta la inclusión de la comunidad en la administración, O&M del sistema, cultivando el sentido de pertenencia frente a la tecnología y la responsabilidad para que funcione adecuadamente, ya sea como usuarios o como operarios, teniendo en cuenta que en la descentralización existe la posibilidad de que la comunidad opere los sistemas.	Aceptación de reuso
		Participación de la comunidad en administración, O&M del sistema
Demografía	El tamaño, densidad y distribución poblacional son indicadores que caracterizan la demografía del lugar donde se va a implementar el tratamiento descentralizado, importantes para determinar la cantidad de servidores que se tienen y tendrán a futuro, y que influyen en el nivel de descentralización del proyecto.	Tamaño de población
		Densidad poblacional
		Distribución poblacional
Impacto ambiental	La disponibilidad de agua hace referencia a la cantidad de recurso hídrico con el que cuenta la población y que en determinado caso podría potencializar el reuso, producción de lodos en lo referente al tipo de tecnología a implementar y su manejo, el reciclaje de nutrientes como materia prima para recuperación energía y la afectación paisajística, olores, ruido y generación de vectores que impactan la salud y el bienestar de la comunidad sobre todo en sistemas descentralizados ubicados cerca de las viviendas.	Reciclaje de nutrientes
		Disponibilidad de agua
		Producción de lodos
		Producción de Olor, ruido, insectos, afectación paisajística

### 7.3.2 Estadística descriptiva

Los datos para los métodos de Clasificación (Ranking) y Calificación (Rating) se consignan en la Tabla 7.10 y la Tabla 7.11 respectivamente, para los grupos de academia, servicios públicos y consultoría. La muestra recogida para los grupos institucional y de autoridad ambiental no fue representativa, pues solo fue posible encuestar una cantidad de 2 expertos por cada sector, razón por la cual no se han incluido en la Tabla 7.10 y la Tabla 7.11. Sin embargo, se incluyeron en el cálculo de los pesos combinados de consignados en la Tabla 7.12. Para los demás sectores encuestados, la muestra se tuvo en cuenta en la aplicación de la estadística descriptiva, ya que obtuvieron una mayor participación de expertos en la evaluación de la encuesta.

La desviación estándar calculada para cada sector reflejó la variedad de los juicios de los expertos con respecto a la importancia de los indicadores. Una desviación estándar igual a cero implica un acuerdo completo o consenso entre las opiniones de los expertos. Valores mayores a cero significan que existen opiniones divergentes; cuanto mayor sea la desviación estándar, mayor variedad existe entre las opiniones y juicios (Mendoza y Prabhu, 2000).

Se observó una alta diversidad entre las opiniones de los expertos de cada sector en la mayoría de los indicadores de cada aspecto evaluado, debido a las desviaciones estándar que reflejaron los datos. Tanto para el sector de servicios públicos como para el de consultoría se evidenció un interés por el reuso paisajístico del agua residual tratada en la técnica de Clasificación (Ranking), lo que muestra un interés para la implementación de este tipo de mecanismo en zonas urbanas colombianas, para mantenimiento de zonas verdes y de parques que permiten aprovechar el efluente del sistema descentralizado y reducir consumos de agua.

De igual forma, el apoyo institucional fue importante para la implementación de esquemas descentralizados según la Clasificación (Ranking), que reportó desviaciones bajas y promedios que oscilan los 7 y 9 puntos, que indica un consenso en la opinión de los expertos frente a este indicador.

En general, la Calificación (Rating) obtuvo valores muy dispersos que hablan de la subjetividad de la metodología con respecto a los juicios de los expertos. La variable costos fue en la que mayor consistencia presentaron los datos en todos los sectores encuestados, reflejando que es un tema de interés común que puede ser determinante a la hora de implementar un esquema descentralizado.

Tabla 7.10. Porcentaje, Desviación estándar, moda, máximos y mínimos para técnica de Clasificación (Ranking)

Variable	Indicador	Academia					Servicios públicos					Consultoría				
		Prom	Desv	Moda	Max	Min	Prom	Desv	Moda	Max	Min	Prom	Desv	Moda	Max	Min
Costos	Inversión en el sistema de tratamiento	8.07	1.28	9	9	5	7.67	1.41	9	9	5	8.14	1.07	9	9	7
	Operación y mantenimiento del sistema de tratamiento	8.47	1.19	9	9	5	7.89	1.05	7	9	7	7.57	2.23	9	9	3
	Inversión en el sistema de alcantarillado	7.40	1.88	9	9	3	6.67	2.45	9	9	3	8.14	1.07	9	9	7
	Operación y mantenimiento del sistema de alcantarillado	7.13	2.20	9	9	3	6.44	2.60	7	9	2	7.00	2.31	9	9	3
Planeación	Apoyo institucional para esquemas descentralizados	7.80	1.47	9	9	5	8.22	0.97	9	9	7	8.43	0.98	9	9	7
	Interés de empresas de servicios en la administración, O&M	6.13	1.55	7	9	3	6.67	2.12	9	9	3	7.71	1.50	9	9	5
	Existencia de zonas periurbanas y de expansión sin cobertura en tratamiento de agua residual	7.53	1.41	7	9	5	6.22	1.86	7	9	3	8.14	1.57	9	9	5
Características tecnológicas	Potencial de reuso	7.13	1.60	7	9	3	6.78	1.92	7	9	2	8.71	0.76	9	9	7
	Cobertura en alcantarillado	7.13	2.20	9	9	1	7.44	1.67	9	9	5	8.43	0.98	9	9	7
	Nivel de descentralización	7.60	1.59	9	9	5	7.22	1.56	7	9	5	8.14	1.07	9	9	7
Características de la zona	Disponibilidad de área	8.00	1.46	9	9	5	7.78	0.97	7	9	7	8.14	1.07	9	9	7
	Objetivos de calidad	7.40	1.35	7	9	5	7.67	1.66	9	9	4	8.57	0.79	9	9	7
	Distancia al punto de descarga	6.53	1.55	7	9	3	5.78	0.97	5	7	5	7.29	1.80	9	9	5
	Topografía de la zona	7.73	1.10	7	9	6	6.78	1.64	5	9	5	7.00	2.31	9	9	3
Tipo de reuso	Agricultura	7.47	1.46	7	9	5	6.00	2.83	7	9	1	4.86	2.34	5	8	1
	Acuicultura	5.67	1.80	7	9	3	4.89	2.57	7	7	1	4.86	2.34	5	8	1
	Urbanístico (riego de parques y zonas verdes) lavado de calles	6.47	1.92	5	9	3	6.22	0.97	7	7	5	8.71	0.76	9	9	7
	Recuperación de energía	5.80	2.24	7	9	1	6.22	2.54	9	9	3	7.29	2.14	7	9	3
Comunidad	Aceptación de reuso	7.60	1.99	9	9	3	7.89	1.45	9	9	5	7.57	2.23	9	9	3
	Participación de la comunidad en administración, O&M del sistema	7.13	2.36	9	9	2	7.78	1.39	9	9	5	8.71	0.76	9	9	7
Demografía	Tamaño de población	7.60	1.92	9	9	3	7.67	0.87	7	9	7	6.57	3.26	9	9	1
	Densidad poblacional	7.80	1.82	9	9	3	6.78	1.79	7	9	3	5.00	3.46	1	9	1
	Distribución poblacional	7.60	2.38	9	9	2	6.56	1.59	5	9	5	6.14	3.24	9	9	1
Impacto ambiental	Reciclaje de nutrientes	7.93	1.49	9	9	5	5.56	1.94	5	9	2	6.43	3.21	9	9	1
	Disponibilidad de agua	7.53	2.20	9	9	3	6.44	2.30	9	9	3	8.00	1.53	9	9	5
	Producción de lodos	7.53	1.77	9	9	3	7.33	1.41	7	9	5	7.00	2.31	9	9	3
	Producción de Olor/ruido/insectos/afectación paisajística	8.00	1.56	9	9	5	8.11	1.36	9	9	5	8.43	0.98	9	9	7

Tabla 7.11. Porcentaje, Desviación estándar, moda, máximos y mínimos para técnica de Calificación (Rating)

Variable	Indicador	Academia					Servicios públicos					Consultoría				
		Prom	Desv	Moda	Max	Min	Prom	Desv	Moda	Max	Min	Prom	Desv	Moda	Max	Min
Costos	Inversión en el sistema de tratamiento	29.33	11.47	30	60	10	26.11	9.93	20	40	10	40.00	23.98	40	90	15
	Operación y mantenimiento del sistema de tratamiento	29.33	5.94	30	40	15	26.67	7.50	30	40	15	20.36	8.71	20	30	2.5
	Inversión en el sistema de alcantarillado	20.33	8.55	20	40	5	24.44	12.61	30	50	10	24.29	9.32	30	30	5
	Operación y mantenimiento del sistema de alcantarillado	21.00	7.61	20	30	5	22.78	7.12	30	30	10	15.36	9.83	10	30	2.5
Planeación	Apoyo institucional para esquemas descentralizados	47.00	20.16	40	80	20	46.11	9.28	50	60	30	39.29	17.42	30	70	15
	Interés de empresas de servicios en la administración, O&M	22.00	11.31	10	40	10	26.67	9.01	30	40	10	33.57	18.87	30	75	20
	Existencia de zonas periurbanas y de expansión sin cobertura en tratamiento de agua residual	31.00	12.85	30	50	10	27.22	12.02	20	50	10	27.14	12.54	30	40	10
Características tecnológicas	Potencial de reuso	34.00	16.39	25	70	10	31.11	16.16	20	60	10	37.14	21.19	40	80	15
	Cobertura en alcantarillado	30.00	12.82	25	50	0	37.22	13.02	30	60	20	27.86	13.18	40	40	5
	Nivel de descentralización	36.00	16.92	40	70	10	31.67	13.23	20	60	20	35.00	23.27	40	80	5
Características de la zona	Disponibilidad de área	32.00	16.01	30	80	20	36.11	12.69	30	60	20	20.00	9.57	20	30	5
	Objetivos de calidad	27.67	13.61	20	60	10	27.78	9.39	30	40	10	27.86	15.77	30	60	10
	Distancia al punto de descarga	16.67	8.16	20	30	0	18.89	7.41	10	30	10	31.43	21.93	20	80	20
	Topografía de la zona	23.67	11.41	30	40	0	17.22	7.55	10	30	10	20.71	10.18	30	30	5
Tipo de reuso	Agricultura	36.67	19.61	30	100	20	21.11	14.95	25	50	0	13.93	7.89	20	20	2.5
	Acuicultura	17.33	6.51	20	25	0	17.78	10.34	25	30	0	13.93	7.89	20	20	2.5
	Urbanístico (riego de parques y zonas verdes) lavado de calles	23.00	14.98	10	50	0	34.44	29.94	10	90	10	51.43	25.45	30	90	30
	Recuperación de energía	23.00	16.34	10	50	0	26.67	14.79	10	50	10	20.71	10.18	30	30	5
Comunidad	Aceptación de reuso	45.33	19.59	50	80	10	52.22	22.24	50	90	20	45.71	17.18	50	60	10
	Participación de la comunidad en administración, O&M del sistema	54.67	19.59	50	90	20	47.78	22.24	50	80	10	54.29	17.18	50	90	40
Demografía	Tamaño de población	39.75	12.37	40	80	30	37.78	12.02	30	60	20	44.29	18.13	30	80	30
	Densidad poblacional	29.42	6.76	30	40	10	31.11	9.61	30	50	20	26.43	11.80	30	40	10
	Distribución poblacional	30.83	11.47	30	50	0	31.11	16.35	30	60	10	29.29	13.05	40	40	5
Impacto ambiental	Reciclaje de nutrientes	27.33	18.79	20	80	10	17.22	8.70	15	30	5	20.00	11.18	30	30	5
	Disponibilidad de agua	24.67	12.46	30	50	10	23.89	11.40	20	40	5	29.29	8.38	20	40	20
	Producción de lodos	19.33	8.42	20	30	0	23.89	12.69	30	50	10	20.00	9.57	30	30	5
	Producción de Olor/ruído/insectos/afectación paisajística	28.67	14.94	20	60	0	35.00	19.36	40	80	15	30.71	17.90	20	60	10

### **7.3.3 Resultados de aplicación de técnicas de Clasificación (Ranking) y Calificación (Rating)**

Se presentaron cuatro aspectos que gobiernan la implementación de esquemas descentralizados: económico e institucional, tecnológico, social y ambiental. La Tabla 7.12 muestra los pesos combinados de los indicadores evaluados para todos los sectores encuestados. Adicionalmente, se recopilieron los promedios y las desviaciones estándar de cada indicador considerados en la encuesta.

En general, en el método de Clasificación (Ranking) se observaron datos con dispersiones altas, en el caso de operación y mantenimiento del sistema de alcantarillado, el reuso en agricultura, acuicultura y recuperación de energía, el tamaño, densidad y distribución poblacional, entre otros. Ello indica que las opiniones de los expertos varían significativamente con respecto a estos indicadores.

Para la técnica de Calificación (Rating), se presentaron dispersiones menores que en el otro método, pero que merecen ser consideradas. En el caso del reuso urbanístico, se presentó la mayor dispersión que indica que no ha existido un consenso entre las opiniones de los expertos encuestados. De igual forma, la aceptación de reuso y la participación de la comunidad son indicadores con dispersiones altas, ya que al ser estos los únicos indicadores que se tienen en cuenta en la variable comunidad, es más probable que haya presentado un sesgo relacionado con la divergencia de opiniones de los encuestados.

La Figura 7.3 muestra los pesos relativos de los indicadores del aspecto económico. En costos, los indicadores “Inversión en el sistema de tratamiento” y “Operación y mantenimiento del sistema de tratamiento” fueron los de mayor peso relativo con 28.30 y 26.93 respectivamente, indicando la preferencia de los encuestados por los costos del sistema de tratamiento que los del sistema de alcantarillado. Teniendo en cuenta estos resultados, podría concluirse que no se ha tenido suficientemente claro la relevancia de los costos de alcantarillado en la implementación de esquemas descentralizados, entendiendo que se pueden reducir más del 60% de los costos de inversión del sistema.



Tabla 7.12. Pesos relativos combinados

Variable	Indicador	Calificación (Rating)			Clasificación (Ranking)			Pesos Combinados
		Promedio	Desviación Estándar	Pesos Relativos	Promedio	Desviación Estándar	Pesos Relativos	
Costos	Inversión en el sistema de tratamiento	30.43	14.32	30.43	7.97	1.22	26.17	28.30
	Operación y mantenimiento del sistema de tratamiento	26.93	7.62	26.93	8.20	1.39	26.92	26.93
	Inversión en el sistema de alcantarillado	22.29	9.42	22.29	7.31	1.89	24.02	23.15
	Operación y mantenimiento del sistema de alcantarillado	20.36	7.86	20.36	6.97	2.23	22.89	21.62
Planeación	Apoyo institucional para esquemas descentralizados	44.66	16.26	44.66	8.09	1.20	36.19	40.42
	Interés de empresas de servicios en la administración, O&M	25.51	12.67	25.51	6.77	1.80	30.31	27.91
	Existencia de zonas periurbanas y de expansión sin cobertura en tratamiento de agua residual	29.83	12.33	29.83	7.49	1.69	33.50	31.67
Características tecnológicas	Potencial de reuso	33.57	17.00	33.57	7.34	1.73	32.61	33.09
	Cobertura de alcantarillado	32.14	13.46	32.14	7.63	1.80	33.88	33.01
	Nivel de descentralización	34.29	16.68	34.29	7.54	1.48	33.50	33.89
Características de la zona	Disponibilidad de área	31.71	14.80	31.71	8.03	1.20	27.07	29.39
	Objetivos de calidad	27.00	12.44	27.00	7.71	1.34	26.01	26.51
	Distancia al punto de descarga	20.14	12.69	20.14	6.60	1.58	22.25	21.20
	Topografía de la zona	21.14	9.78	21.14	7.31	1.60	24.66	22.90

Tabla 7.12. Pesos relativos combinados (continuación)

Variable	Indicador	Calificación (Rating)			Clasificación (Ranking)			Pesos Combinados
		Promedio	Desviación Estándar	Pesos Relativos	Promedio	Desviación Estándar	Pesos Relativos	
Tipo de reuso	Agricultura	25.79	18.02	25.79	6.31	2.30	25.11	25.45
	Acuicultura	16.64	8.51	16.64	5.34	2.31	21.25	18.95
	Urbanístico (riego de parque y zonas verdes), lavado de calles	32.43	23.43	32.43	7.03	1.72	27.95	30.19
	Recuperación de energía	25.14	15.12	25.14	6.46	2.27	25.68	25.41
Comunidad	Aceptación de reuso	46.86	18.91	46.9	7.66	1.83	49.54	48.20
	Participación de la comunidad en administración, O&M del sistema	53.14	18.91	53.1	7.80	1.83	50.46	51.80
Demografía	Tamaño de población	39.32	13.20	39.3	7.29	2.09	34.05	36.68
	Densidad poblacional	30.32	8.81	30.3	7.00	2.36	32.71	31.52
	Distribución poblacional	30.35	12.54	30.4	7.11	2.32	33.24	31.80
Impacto ambiental	Reciclaje de nutrientes	22.14	14.41	22.1	6.86	2.33	23.23	22.69
	Disponibilidad de agua	25.71	10.92	25.7	7.34	2.07	24.88	25.30
	Producción de lodos	21.57	10.34	21.6	7.20	1.88	24.39	22.98
	Olor/ruido/insectos/afectación paisajística	30.57	15.89	30.6	8.11	1.41	27.49	29.03

Como planeación, el indicador “Apoyo institucional para esquemas descentralizados” fue el de mayor peso con 40.42, seguido por los indicadores “Existencia de zonas periurbanas y de expansión sin cobertura en tratamiento de aguas residuales” e “Interés de empresas de servicios en la administración, O&M” con pesos de 31.67 y 27.91 respectivamente. De aquí se evidencia que se considera de gran importancia el apoyo institucional para la implementación de esquemas descentralizados, con mayor potencial de implementarse en zonas periurbanas y áreas de expansión sin cobertura de alcantarillado.

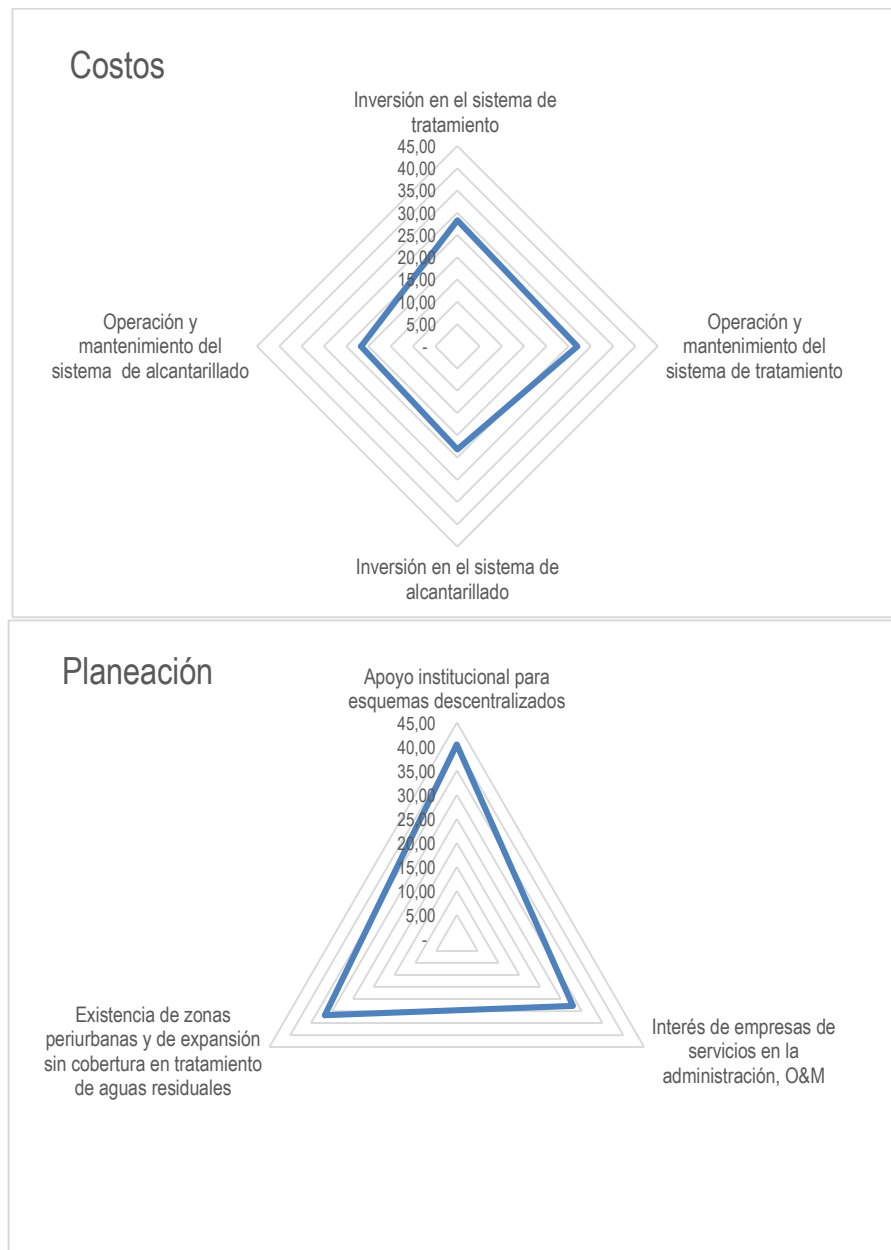


Figura 7.3. Pesos relativos de aspecto económico e institucional

En el aspecto tecnológico, se presentan 3 variables importantes que influyen en el tipo de tecnología que se debe emplear. Uno de estos son las características tecnológicas que se compone de 3 indicadores de similar importancia, según la opinión de los expertos. Por lo tanto, el éxito en la selección de una tecnología de tratamiento con enfoque descentralizado depende de considerar el potencial de reuso, el nivel de descentralización y la cobertura de alcantarillado como parámetros fundamentales en las fases de planeación del proyecto.

El indicador “Disponibilidad de área” es el de mayor peso en las características de la zona con 29.39 puntos, seguido por los “Objetivos de calidad”, “Topografía de la zona” y “Distancia al punto de descarga” con pesos de 26.51, 22.90 y 21.20 respectivamente. Con estos puntajes se puede observar que es más importante la disponibilidad de área para el sistema descentralizado que la topografía del terreno, es decir, que se considera un factor importante para implementar la tecnología en zonas urbanas donde la cantidad de área puede ser limitada o inexistente. Es probable que no exista una comprensión adecuada acerca de la importancia del punto de descarga en la implementación de enfoques descentralizados, pues es un indicador relacionado con la construcción de alcantarillado urbano que eleva los costos de adopción del tratamiento con enfoque descentralizado; además es un indicador asociado al potencial de reuso in sitio evitando la recolección y transporte del agua residual.

El reuso con fines paisajísticos/urbanísticos obtuvo el mayor puntaje, seguido por los tipos de reuso en agricultura y recuperación de energía con similar puntuación. Es posible que el mayor potencial de reuso del agua residual tratada del sistema descentralizado en Colombia sea para riego agrícola, entendiendo que la demanda hídrica para dicha actividad corresponde al 54% de la demanda hídrica total del país según MAVDT (2010b), que se satisface mediante el uso de las fuentes aledañas, generalmente contaminadas. Sin embargo, los diversos tipos de aprovechamiento que ofrecen los esquemas descentralizados dentro de las zonas urbanas, ha motivado a pensar a los expertos en la viabilidad del reuso en los límites urbanos, lo que incluye riego de parque y zonas verdes. El reuso en acuicultura no tuvo mucha aceptación entre los encuestados, dados los altos estándares de calidad que debe alcanzar el tratamiento para que esto pueda ser llevado a cabo, además de la aceptación cultural que pueda requerir esta forma de aprovechamiento del agua residual tratada. La Figura 7.4 describe los pesos relativos de cada indicador del aspecto tecnológico, según las variables relevantes seleccionadas para el estudio.

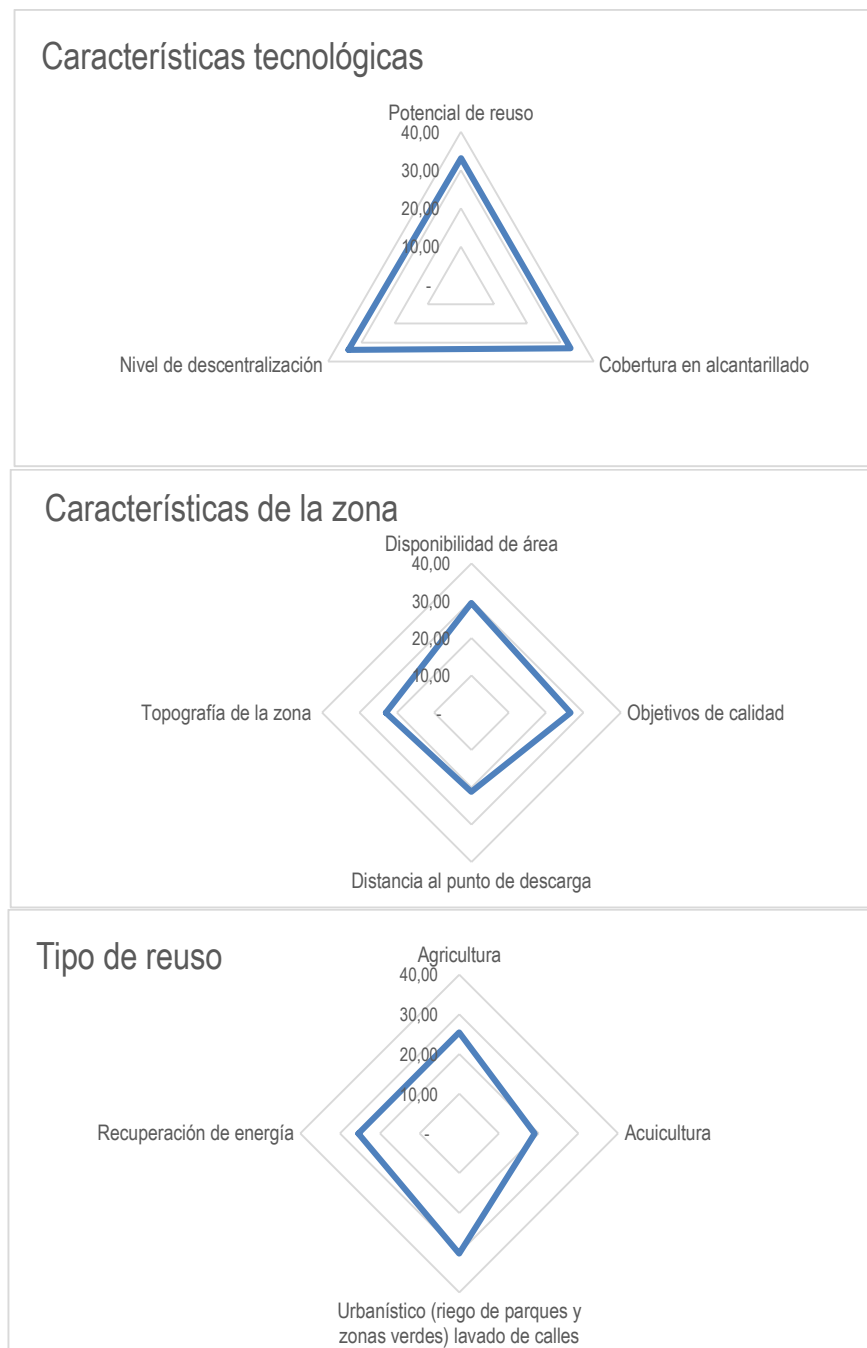


Figura 7.4. Pesos relativos de aspecto tecnológico

Los indicadores de la variable comunidad alcanzaron puntajes similares, notándose una pequeña diferencia entre los dos. El peso relativo del indicador “Participación de la comunidad en administración, O&M del sistema” fue de 51.80, mientras el de “Aceptación de reuso” obtuvo un puntaje de 48.20. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la Figura 7.3, en el indicador “Interés de empresas de servicios en la administración, O&M” se evidenció que los expertos consideran que la participación de las empresas de servicios públicos en el sostenimiento del

sistema descentralizado podría ser baja. Conforme a este resultado, es comprensible que el mayor peso recibido lo obtenga la participación de la comunidad, entendiendo que para lograr la sostenibilidad de un esquema descentralizado se requiere empoderar y cultivar en los usuarios un sentido de pertenencia.

El “Tamaño de población” fue el indicador más destacado en la demografía, entendiendo que este abarca el número de usuarios que se conectarán al sistema de tratamiento. Este indicador reportó un peso relativo de 36.68, seguido de la “Distribución poblacional” y “Densidad poblacional” con 31.80 y 31.52 puntos respectivamente. Estos pesos relativos se muestran definidos en la Figura 7.5.

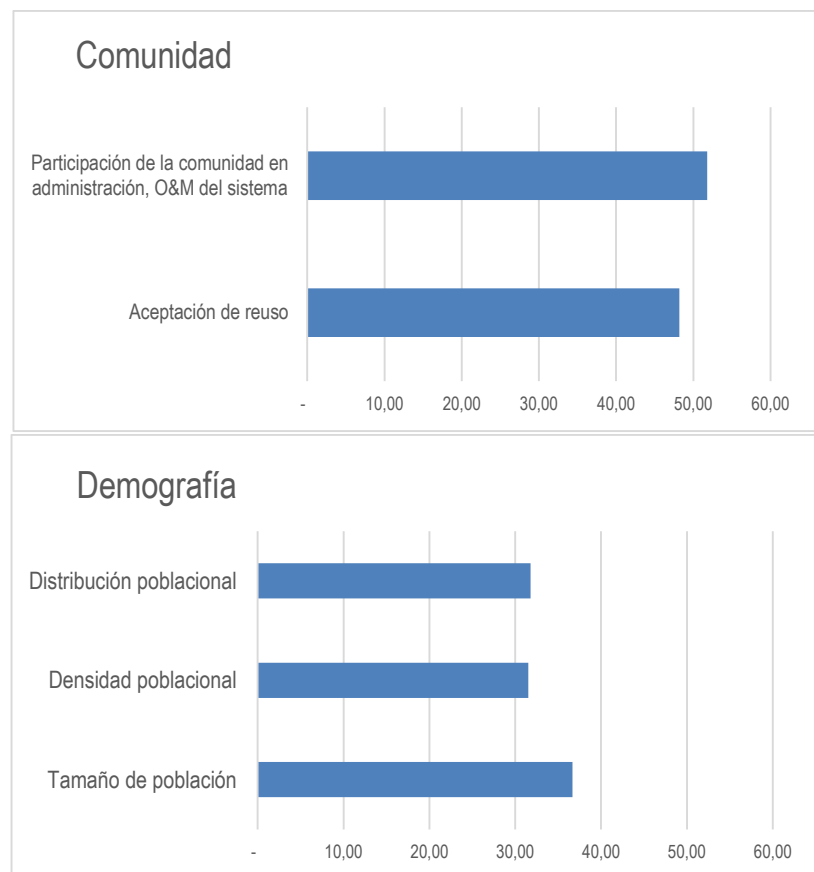


Figura 7.5. Pesos relativos de aspecto social

En impacto ambiental, el orden de prioridad de los indicadores fue “Producción de Olor/ruido/insectos/afectación paisajística”, “Disponibilidad de agua”, “Producción de lodos” y “Reciclaje de nutrientes”, con pesos relativos de 29.03, 25.30, 22.98 y 22.69 respectivamente. Al tratarse de sistemas de tratamiento lo más cercanos del punto de generación de agua residual, se ha dado prioridad a la producción de olor/ruido/insectos/afectación paisajística con el fin de promover condiciones de salubridad y bienestar a la comunidad. De igual manera, la existencia de fuentes hídricas en la zona influye en la decisión buscando el bienestar del medio ambiente al evitar la

contaminación de los cauces y ríos, y el potencial de reuso en caso de escasez de agua. El reciclaje de nutrientes y la producción de lodos resultan menos importantes según la opinión de los expertos encuestados. De aquí se confirma el hecho de que los expertos se hayan inclinado por el reuso paisajístico y urbanístico antes que por el reuso agrícola, entendiendo que el reciclaje de nutrientes se logra principalmente en el desarrollo de esta última actividad. Esto puntajes se pueden observar en la Figura 7.6.

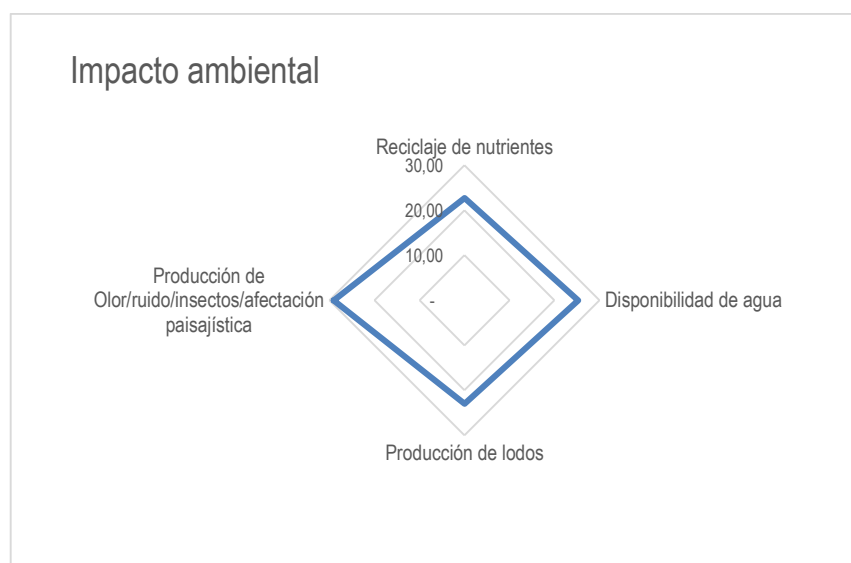


Figura 7.6. Pesos relativos de aspecto ambiental

En la Tabla 7.13 se resumen las variables e indicadores priorizados en el análisis realizado mediante las técnicas de Clasificación (Ranking) y Calificación (Rating) para la implementación de esquemas descentralizados en zonas urbanas de Colombia.

Tabla 7.13. Orden de prioridad de indicadores analizados para descentralización

Variable	Indicador	Pesos combinados
Costos	Inversión en el sistema de tratamiento	28.30
	Operación y mantenimiento del sistema de tratamiento	26.93
	Inversión en el sistema de alcantarillado	23.15
	Operación y mantenimiento del sistema de alcantarillado	21.62
Planeación	Apoyo institucional para esquemas descentralizados	40.42
	Existencia de zonas periurbanas y de expansión sin cobertura en tratamiento de agua residual	31.67
	Interés de empresas de servicios en la administración, O&M	27.91
Características tecnológicas	Nivel de descentralización	33.89
	Potencial de reuso	33.09
	Cobertura de alcantarillado	33.01

Tabla 7.13. Orden de prioridad de indicadores analizados para descentralización (continuación)

Variable	Indicador	Pesos combinados
Características de la zona	Disponibilidad de área	29.39
	Objetivos de calidad	26.51
	Topografía de la zona	22.90
	Distancia al punto de descarga	21.20
Tipo de reuso	Urbanístico (riego de parque y zonas verdes), lavado de calles	30.19
	Agricultura	25.45
	Recuperación de energía	25.41
	Acuicultura	18.95
Comunidad	Participación de la comunidad en administración, O&M del sistema	51.80
	Aceptación de reuso	48.20
Demografía	Tamaño de población	36.68
	Distribución poblacional	31.80
	Densidad poblacional	31.52
Impacto ambiental	Olor/ruido/insectos/afectación paisajístico	29.03
	Disponibilidad de agua	25.30
	Producción de lodos	22.98
	Reciclaje de nutrientes	22.69

Comparando con las experiencias analizadas en la sección 7.1, sobre los indicadores para la descentralización del manejo del agua residual urbana identificados en la Tabla 7.6, se puede concluir que se consideró de poca importancia el “nivel de descentralización” observando la cantidad de experiencias que toman en cuenta este indicador. Caso contrario, para el contexto local, según los resultados de la encuesta, fue el indicador más relevante de la variable características tecnológicas.

La disponibilidad de área demostró ser un indicador a considerar para esquemas descentralizados en Colombia, teniendo el mayor peso combinado de la variable características de la zona. En el aspecto ambiental, se observó que la producción de olores, insectos, ruido y la afectación paisajística evidenciaron ser importantes para la implementación de esquemas descentralizados, mientras en el contexto global se prestó mayor atención a la conservación de recursos.

Fue posible comparar la densidad poblacional y la distribución poblacional, que para el contexto local esta última obtuvo mayor peso en la implementación de enfoques descentralizados. Por otra parte, a nivel global la distribución poblacional tuvo una importancia baja comparada con la densidad poblacional que fue el indicador presente en mayor número de experiencias dentro de la variable población.

Por otra parte, se identificaron ciertos indicadores relevantes tanto a nivel local como global. Ellos son tamaño de población, participación de la comunidad, reuso urbanístico y el apoyo institucional para esquemas descentralizados.



## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 CONCLUSIONES

#### *Revisión del estado de arte y experiencias sobre descentralización*

Se realizó la revisión de experiencias sobre descentralización para el tratamiento del agua residual, las cuales en su mayoría corresponden a países en desarrollo, alrededor del 67% de las experiencias tratan sobre la implementación actual o futura de esquemas descentralizados en zonas urbanas, evidenciando el interés por la búsqueda de soluciones al problema de la contaminación hídrica de forma no convencional y sostenible, sobre todo en países de bajos recursos dadas las ventajas que estos sistemas evidencian comparados con los esquemas centralizados, desde los puntos de vista económico e institucional, tecnológico, social y ambiental.

#### *Identificación de aspectos claves para la descentralización en el manejo del agua residual*

A partir de la revisión del estado del arte y experiencias, se identificaron en total 52 indicadores distribuidos en 10 variables para los aspectos económico e institucional, tecnológico, social y ambiental, para la selección de esquemas descentralizados, de los cuales 11 demostraron obtener una importancia mayor a los demás al mencionarse en 50% o más del total de experiencias analizadas. De esta forma, se tiene que la factibilidad económica, el apoyo institucional y político, la eficiencia, el potencial de reuso, el reuso paisajístico/urbanístico, las políticas gubernamentales y regulaciones regionales, la localización del proyecto, la participación comunitaria, la conciencia ambiental, los usos y demanda de agua, el tamaño y la densidad poblacional, la conservación de recursos y la disponibilidad de agua, son los indicadores más relevantes para el estudio.

#### *Aspectos claves para la descentralización del agua residual en Colombia*

Los resultados de la aplicación de la metodología revelaron que en tema de costos, prima la inversión, operación y mantenimiento del sistema de tratamiento que la del sistema de alcantarillado. Así mismo, es fundamental el apoyo institucional para esquemas descentralizados como parte de la planeación del proyecto. En tema de características tecnológicas, se obtuvo que los indicadores “potencial de reuso”, “nivel de descentralización” y “cobertura de alcantarillado” son de similar importancia y que deben considerarse en el proceso de decisión. El reuso urbanístico fue el indicador más relevante dentro de los tipos de reuso evaluados.

La aceptación al reuso y la participación en administración, O&M del sistema por parte de la comunidad han demostrado ser relevantes en el proceso de decisión, teniendo en cuenta que obtuvieron pesos combinados similares. Con respecto a la demografía, se tiene que el tamaño de población tuvo el peso más alto, seguido por la distribución poblacional.

En el aspecto ambiental, lo prioridad fue la producción de olor/ruido/insectos/afectación paisajística, ya que al tratarse de sistemas que operan dentro de los límites residenciales en la mayoría de los casos, es vital conservar el bienestar comunitario para que la tecnología tenga la aceptación necesaria.

Comparando la información obtenida del análisis de la encuesta con la que se obtuvo en la revisión del estado del arte, se evidenció que para el contexto colombiano existen indicadores que tienen mayor importancia que para el contexto global, tales como el nivel de descentralización, disponibilidad de área y distribución de población. De igual forma, se observaron indicadores que para los dos contextos reportaron importancias similares como la participación de la comunidad y el apoyo institucional para la descentralización.

De la revisión del estado del arte y de la aplicación de la metodología de análisis multicriterio se concluye que los indicadores identificados son aplicables para esquemas descentralizados y centralizados. Sin embargo, el nivel de prioridad de cada uno varía dependiendo del tipo de esquema que se desee implementar.

## **8.2 RECOMENDACIONES**

Una de las limitantes del proyecto fue la divergencia en los pensamientos y opiniones de los expertos encuestados, que generaron sesgos en la aplicación del modelo. La mayoría de los expertos encuestados representan al sector académico, siendo alrededor del 43% de las encuestas. La baja participación, falta de interés y tiempo limitado de aquellas personas que se invitaron a participar en la encuesta impidió el desarrollo apropiado del modelo, al no tener una igualdad en la cantidad de opiniones de todos los sectores incluidos. Es recomendable incluir la opinión de más expertos de aquellos grupos que no obtuvieron buena participación e incluir otros sectores asociados al tema del manejo del agua residual que permita un análisis más acertado sobre la priorización de los indicadores para la descentralización.

Cabe destacar que este estudio corresponde a un primer acercamiento a la identificación de indicadores claves para la implementación de esquemas descentralizados de manejo del agua residual en Colombia. Es necesario continuar profundizando en esta temática para definir, de acuerdo con el nivel de descentralización, como varía el orden de prioridad de los indicadores identificados.

Se recomienda llevar a cabo nuevamente la metodología de Análisis de Decisión Multicriterio empleando los mismos aspectos e indicadores consignados en la Tabla 7.13 que se identificaron en el documento, direccionando el estudio hacia el orden de prioridad que evidencian los indicadores para el manejo del agua residual centralizado, de forma tal que permita una adecuada comparación entre ambos sistemas al tener en cuenta que los indicadores son aplicables para los dos tipos de esquemas de manejo de agua residual.

## 9 BIBLIOGRAFIA

- AGUATUYA. (2011). Tratamiento descentralizado de aguas servidas domésticas y estudio de caso. Cochabamba, Bolivia.
- Anderson, J. M. (1996). Current water recycling initiatives in Australia: scenarios for the 21st century. *Water Science and Technology*, 33(10), 37-43.
- Aragón, F. (1999). Selección de tecnología sostenible para la disposición de aguas residuales en la vereda de Juanchaco. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Asano, T. (2005). Urban water recycling. *Water Science & Technology*, 51(8), 83-89.
- Ashley, K., Cordell, D., y Mavinic, D. (2011). A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere*, 84(6), 737-746.
- Assayed, A. (2008). Gray Wastewater Management: Sustainable Options for Crop Production in the East Mediterranean Region. In: *Sustainable Management of Wastewater for Agriculture*, Aleppo, Siria, 25-31.
- Azar, C., Holmberg, J., y Lindgren, K. (1996). Socio-ecological indicators for sustainability. *Ecological economics*, 18(2), 89-112.
- Bakir, H. A. (2001). Sustainable wastewater management for small communities in the Middle East and North Africa. *Journal of environmental management*, 61(4), 319-328.
- Balkema, A. J., Preisig, H. A., Otterpohl, R., y Lambert, F. J. (2002). Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. *Urban Water*, 4(2), 153-161.
- Baumann, D., Boland, J., y Sims, J. (1980). The problem of defining water conservation. *The Cornett Papers*. University of Victoria, Victoria BC, 125-134.
- Bengtsson, M., Lundin, M., y Molander, S. (1997). Life Cycle Assessment of wastewater systems- Case studies of conventional treatment, urine sorting and liquid composting in three Swedish municipalities. Chalmers University of Technology.
- Borsuk, M. E., Maurer, M., Lienert, J., y Larsen, T. A. (2008). Charting a path for innovative toilet technology using multicriteria decision analysis. *Environmental Science and Technology*, 42(6), 1855-1862.
- Brown, V., Jackson, D., y Khalifé, M. (2010). 2009 Melbourne metropolitan sewerage strategy: A portfolio of decentralised and on-site concept designs. *Water Science and Technology*, 62(3), 510-517.
- Butler, D., y Parkinson, J. (1997). Towards sustainable urban drainage. *Water Science and Technology*, 35(9), 53-63.

- CNES. (2003). Approaches to Sanitation Services. In: Water Policy Series A. Water and Domestic Policy Issues A5, 12., C. N. o. E. Services, ed.
- CNPMLTA. (2010). Ahorro y uso eficiente del agua. CNPMLTA - Centro Nacional de Producción Mas Limpia y Tecnologías Ambientales, Colombia.
- CODESAB (2011). Los Retos: Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales. Foro Metropolitano de Cochabamba del Agua y Saneamiento. Universidad Mayor de San Simón - Bolivia.
- Collazos, C. J. (2008a). Tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Collazos, C. J. (2008b). Estudio de casos. Tratamiento de aguas residuales con tecnología UASB. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Cooper, E. (2003). Rouse hill and Picton Reuse schemes: Innovative approaches to large-scale reuse. Water Science and Technology: Water Supply, 3, 49-54.
- Cordell, D., Rosemarin, A., Schröder, J., y Smit, A. (2011). Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. Chemosphere, 84(6), 747-758.
- Crites, R., y Tchobanoglous, G. (1998). Small and decentralized wastewater management systems. McGraw-Hill, Nueva York.
- Cheng, H., y Hu, Y. (2010). Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. Bioresource technology, 101(11), 3816-3824.
- Daigger, G. T. (2009). Evolving urban water and residuals management paradigms: water reclamation and reuse, decentralization, and resource recovery. Water Environment Research, 81(8), 809-823.
- DNP. (2010). Retos del Sector para el cumplimiento de las metas del milenio. DNP - Departamento Nacional de Planeación, Colombia.
- DTO. (1994). Sustainable municipal water cycle, an inventory. RYZA, Lelystad, Holanda.
- Emmerson, R. H. C., Morse, G. K., Lester, J. N., y Edge, D. R. (1995). Life cycle analysis of small-scale sewage treatment processes. CIWEM.
- Engin, G. O., y Demir, I. (2006). Cost analysis of alternative methods for wastewater handling in small communities. Journal of environmental management, 79(4), 357-363.
- ETC. (1996). Proceedings of the workshop on sustainable municipal waste water treatment systems. ETC Foundation, Leusden, Holanda.

- Finnsón, A., y Peters, A. (1996). Sustainable urban water systems. MISTRA, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden.
- Gikas, P., y Tchobanoglous, G. (2009). The role of satellite and decentralized strategies in water resources management. *Journal of environmental management*, 90(1), 144-152.
- Grotter, M., y Otterpohl, R. (1996). Integrated Urban Water Concept.
- Haddad, N., Kaï, L., y Mahfoud, C. (2008). Graywater Treatment and Reuse for Water and Food Security in Lebanon. In: *Sustainable Management of Wastewater for Agriculture Aleppo, Siria*.
- Hellström, D., Jeppsson, U., y Kärrman, E. (2000). A framework for systems analysis of sustainable urban water management. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(3), 311-321.
- Ho, G. (2004). Small water and wastewater systems: Pathways to sustainable development? *Water Science & Technology*, 48(11), 7-14.
- Ho, G., y Anda, M. (2006). Centralised versus decentralised wastewater systems in an urban context: the sustainability dimension, IWA Publishing, London.
- Hong, S. W., Choi, Y. S., Kim, S. J., y Kwon, G. (2005). Pilot-testing an alternative on-site wastewater treatment system for small communities and its automatic control. *Water Science and Technology*, 51, 101-108.
- Horan, N., y Parr, J. (1994). Process Selection for Sustainable Wastewater Management in Industrializing Countries. University of Leeds, Inglaterra.
- Icke, J., y Aalderink, R. H. (1997). Assessment methodology for sustainable municipal water management. *H<sub>2</sub>O*, 10, 324-327.
- IDEAM, y Minambiente. (2001). Estudio nacional del agua. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambiental; Ministerio del Medio Ambiente, Colombia.
- INE. (2008). Estadísticas e indicadores del agua; La información estadística, instrumento necesario para una mejor gestión del agua. España.
- Jacobs, E., de Knecht, M., Koedood, J., y Karst, J. (1996). New waterways in an old lake, water management of IJburg, building 18,000 houses in a lake near Amsterdam. *H<sub>2</sub>O*, 20, 616-619.
- Jacobsen, M., Webster, M., y Vairavamoorthy, K. (2013). The Future of Water in African Cities, Why Waste Water?, International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, Washington, DC.
- Jones, D. D., Bauer, J., Wise, R., y Dunn, A. (2001). Small Community Wastewater Cluster Systems, Cooperative Extension Service, Purdue University.
- Kimura, K., Mikami, D., y Funamizu, N. (2007). On-site wastewater reclamation and reuse in individual buildings in Japan. In: *Il monitoraggio della qualità delle acque con stazioni fisse e i*

sistemi di trattamento decentralizzati. Analisi delle soluzioni internazionali e l'approccio in Laguna di Venezia, Magistrato alle Acque di Venezia Congress 3rd-5th October, Palazzo Franchetti, Venice, Italy.

- Kothari, R., Kumar, V., y Tyagi, V. V. (2011). Assessment of waste treatment and energy recovery from dairy industrial waste by anaerobic digestion. *IIOAB Journal*, 2(1).
- Kothari, R., Tyagi, V., y Pathak, A. (2010). Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3164-3170.
- Kresse, K. (2000). La alternativa del saneamiento ambiental centrado en las viviendas (SACV). ACODAL - Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Colombia.
- Lamichhane, K. M. (2007). On-site sanitation: A viable alternative to modern wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 55, 433-440.
- Liang, X., y van Dijk, M. P. (2011). Economic and financial analysis on rainwater harvesting for agricultural irrigation in the rural areas of Beijing. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 1100-1108.
- Libralato, G., Volpi Ghirardini, A., y Avezzù, F. (2012). To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. *Journal of environmental management*, 94(1), 61-68.
- Lundin, M., Molander, S., y Morrison, G. (1999). A set of indicators for the assessment of temporal variations in the sustainability of sanitary systems. *Water Science and Technology*, 39(5), 235-242.
- Lundin, M., y Morrison, G. M. (2002). A life cycle assessment based procedure for development of environmental sustainability indicators for urban water systems. *Urban Water*, 4(2), 145-152.
- Macoun, P., y Prabhu, R. (1999). Guidelines for applying multi-criteria analysis to the assessment of criteria and indicators, CIFOR.
- Manara, P., y Zabaniotou, A. (2012). Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2566-2582.
- Massoud, M. A., Tarhini, A., y Nasr, J. A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of environmental management*, 90(1), 652-659.
- Maurer, M., Rothenberger, D., y Larsen, T. (2005). Decentralised wastewater treatment technologies from a national perspective: at what cost are they competitive? *Water Science and Technology: Water Supply*, 5(6), 145-154.
- MAV. (2007). Venezia, una scelta obbligata. I trattamenti individuali di depurazione. MAV - Magistrato alle Acque di Venezia, Venice, Italy.

- MAVDT. (2006). Abastecimiento de agua y alcantarillado en comunidades rurales en Colombia. B. D.C. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia.
- MAVDT. (2010a). Decreto 3930. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia.
- MAVDT. (2010b). Política Nacional para la Gestión del Recurso Hídrico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia.
- MAVDT, y DNP. (2004). Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia - PMAR. B. D.C. MAVDT - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial DNP - Departamento Nacional de Planeación. Colombia.
- MC. (1998). Orientation for development of urban drainage up to 2020. MC - Ministry of Construction. Hanoi, Vietnam.
- Mels, A. R., Nieuwenhuijzen, A. F., van der Graaf, J. H. J. M., Klapwijk, B., de Koning, J., y Rulkens, W. H. (1999). Sustainability indicators as a tool in the development of new sewage treatment methods. *Water Science and Technology*, 39(5), 243–250.
- Mendoza, G. A., y Prabhu, R. (2000). Multiple criteria decision making approaches to assessing forest sustainability using criteria and indicators: a case study. *Forest Ecology and Management*, 131(1), 107-126.
- Metcalf, I. N. C., y Eddy, H. (2003). Wastewater engineering, treatment and reuse. McGraw Hill, New York.
- Minambiente. (1998). Normatividad sobre el Medio Ambiente Lineamientos de Política para el Manejo Integral del Agua. Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, Colombia.
- Mitchell, V. G. (2004). Integrated urban water management: a review of current Australian practice. CSIRO Melbourne.
- Musiyarira, H., Reynders, C. C., y Marjanovic, P. (2012). Decision Making Support in Wastewater Management: Comparative analysis of techniques and tools used in centralized and decentralized system layouts. *Journal of Economic Development, Environment and People*, 1(1), 79-99.
- Nanninga, T. A., Bisschops, I., López, E., Martínez-Ruiz, J. L., Murillo, D., Essl, L., y Starkl, M. (2012). Discussion on Sustainable Water Technologies for Peri-Urban Areas of Mexico City: Balancing Urbanization and Environmental Conservation. *Water*, 4(3), 739-758.
- Nguyen, M. (2003). Some prioritisation methods for defence planning.
- Nhapi, I., y Gijzen, H. J. (2005). A 3-step strategic approach to sustainable wastewater management. *Water SA*, 31(1), 133-140.

- Niemczynowicz, J. (1994). New aspects of urban drainage and pollution reduction towards sustainability. *Water Science and Technology*, 30(5), 269-277.
- Nudelman, M. A., y Pérez, R. G. (2006). Conceptos para el manejo de la sostenibilidad del ciclo urbano del agua. Brasil.
- Ødegaard, H. (1995). An evaluation of cost efficiency and sustainability of different wastewater treatment processes. *Vatten*, 51, 291-299.
- Omer, A. M. (2008a). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2265-2300.
- Omer, A. M. (2008b). Green energies and the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(7), 1789-1821.
- OMS. (2002). Environmental Health. Eastern Mediterranean Regional Center for Environmental Health Activities. Organización Mundial de la Salud.
- ONU-Habitat. (2012). Estado de las Ciudades de América Latina y el Caribe 2012, Rumbo a una nueva transición urbana. In: ONU-Habitat, Por un Mejor Futuro Urbano.
- Orozco, A. (2005). Bioingeniería de aguas residuales, ACODAL - Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Bogotá, Colombia.
- Otis, R. (1996). Small diameter gravity sewers: experience in the United States. In: *Low-Cost Sewerage*, 123-133.
- Otterpohl, R., Grottker, M., y Lange, J. (1997). Sustainable water and waste management in urban areas. *Water Science and Technology*, 35(9), 121-133.
- Parkinson, J., Goldenfum, J. A., y Tucci, C. E. (2010). *Integrated Urban Water Management: Humid Tropics*, CRC Press.
- Parkinson, J., y Tayler, K. (2003). Decentralized wastewater management in peri-urban areas in low-income countries. *Environment and Urbanization*, 15(1), 75-90.
- Prihandrijanti, M., Malisie, A., y Otterpohl, R. (2008). Cost-Benefit Analysis for Centralized and Decentralized Wastewater Treatment System (Case Study in Surabaya-Indonesia). In: *Efficient Management of Wastewater*. I. A. Baz, R. Otterpohl, and C. Wendland, eds., Springer Berlin Heidelberg, 259-268.
- Ramírez, L. A. (2002). *Teoría de Sistemas*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Rauch, W., Brockmann, D., Peters, I., Larsen, T. A., y Gujer, W. (2003). Combining urine separation with waste design: An analysis using a stochastic model for urine production. *Water Research*, 37(3), 681-689.
- Romero, C. (1996). *Análisis de las decisiones multicriterio*, Isdefe Madrid.



- Ronteltap, M., Maurer, M., y Gujer, W. (2007). The behaviour of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine. *Water Research*, 41(9), 1859-1868.
- Schertenleib, R. (2001). Principles and Implications of Household Centered Approach in Environmental Sanitation. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), Duebendorf, Suiza.
- Schertenleib, R. (2011). Planning for Sustainable Sanitation: main challenges; traditional planning approaches; new planning methodologies. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), Suiza.
- Siebel, M. A., y Gijzen, H. (2002). Application of cleaner production concepts in urban water management. Delft, Holanda.
- Singhirunnusorn, W. (2009). An Appropriate Wastewater Treatment System in Developing Countries: Thailand as a Case Study University of California, Los Angeles.
- Suzuki, Y., Ogoshi, M., Yamagata, H., Ozaki, M., y Asano, T. (Year). Large-area and on-site water reuse in Japan. International Seminar on Sustainable Development of Water Resource Pluralizing Technology, held at Korean National Institute of Environmental Research.
- Tate, D. M. (2006). Principios del uso eficiente del agua. Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Honduras.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., y Stensel, H. D. (2003). *Metcalf & Eddy Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw Hill, NY.
- Tchobanoglous, G., Ruppe, L., Leverenz, H., y Darby, J. (2004). Decentralized wastewater management: challenges and opportunities for the twenty-first century. *Water Science and Technology: Water Supply*, 95-102.
- Torres, P. (2011). Procesos de tratamiento II: Niveles, procesos y sistemas de tratamiento de agua residual. Santiago de Cali, Colombia.
- Tsagarakis, K. P., Mara, D. D., y Angelakis, A. N. (2001). Wastewater management in Greece: Experience and lessons for developing countries. *Water Science and Technology*, 44(6), 163-172.
- UNICEF. (2009). Crecimiento demográfico y rápida urbanización: aumento de la inseguridad alimentaria en contextos urbanos. Fondo de Naciones Unidas para la Infancia, Nueva York.
- Van Afferden, M., Cardona, J. A., Rahman, K. Z., Daoud, R., Headley, T., Kilani, Z., Subah, A., y Mueller, R. A. (2010). A step towards decentralized wastewater management in the Lower Jordan Rift Valley. *Water Science and Technology*, 61(12), 3117-3128.

- van der Steen, P. (2007). Report providing an inventory of conventional and of innovative approaches for Urban water Management. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delf, The Netherlands.
- Volkman, S. (2003). Sustainable wastewater treatment and reuse in urban areas of the developing world. Michigan Technological University.
- von Sperling, M. (1996) Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Editora UFMG.
- Wang, X. C., Chen, R., Zhang, Q. H., y Li, K. (2008). Optimized plan of centralized and decentralized wastewater reuse systems for housing development in the urban area of Xi'an, China. Water Science and Technology, 58(5), 969.
- Weber, B., Cornel, P., y Wagner, M. (2007). Semi-centralised supply and treatment systems for (fast growing) urban areas. Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research, 55(1-2), 349.
- Wilderer, P. A., y Schreff, D. (2000). Decentralized and centralized wastewater management: A challenge for technology developers. Water Science and Technology, 41, 1-8.
- Wilson, C. D., Whiteman, A., y Tormin, A. (2001). The Planning Guide for Municipal Solid Waste Management. International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank.
- Wright, A. (1997). Toward a Strategic Sanitation Approach. Water and Sanitation Program. The World Bank.
- Zhang, D. (2008). Reuse-oriented Decentralized Wastewater Treatment based on Ecological Sanitation in fast growing Agglomerations. TU Dortmund University, Dortmund, Alemania.

## Referencias URL

- URL-1 <http://www.lanacion.com.ar/155303-el-crecimiento-demografico-mundial>, visitado en Septiembre de 2012.
- URL-2 [www.ces.ncsu.edu](http://www.ces.ncsu.edu), visitado en Junio de 2012.
- URL-3 <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/el-50-del-agua-en-colombia-es-de-mala-calidad.html>, visitado en Diciembre de 2013.
- URL-4 <http://www.sciencedirect.com/bd.univalle.edu.co/>, visitado en Septiembre de 2012.
- URL-5 [http://www.eco-finanzas.com/diccionario/V/VALOR\\_PRESENTE\\_NETO.htm](http://www.eco-finanzas.com/diccionario/V/VALOR_PRESENTE_NETO.htm), visitado en Mayo de 2014.
- URL-6 <http://www.pymesfuturo.com/costobeneficio.html>, visitado en Mayo de 2014.

# **ANEXOS**

## Anexo 1. Encuesta a expertos

En la columna 1 por favor asigne un valor para clasificar el indicador de acuerdo con su percepción de importancia del mismo en el marco de la descentralización en el manejo de las aguas residuales en las zonas urbanas de Colombia, teniendo en cuenta que 1 = no es importante, 3 = menos importante, 5 = moderadamente importante, 7 = importante, 9 = extremadamente importante.

En la columna 2 por favor dar un valor entre 0 y 100 de acuerdo con su opinión, en relación con la importancia de cada indicador para ser considerado en la implementación de sistemas descentralizados en áreas urbanas de Colombia. La suma de los puntajes de la columna 2 debe sumar 100.

### 1. ASPECTO ECONOMICO E INSTITUCIONAL

#### 1.1. Costos

Indicador	1 (Escala 1 – 9)	2 (0 – 100)	Observación
1.1.1. Inversión en el sistema de tratamiento			
1.1.2. Operación y mantenimiento del sistema de tratamiento			
1.1.3. Inversión en el sistema de alcantarillado			
1.1.4. Operación y mantenimiento del sistema de alcantarillado			
Total		100	

#### 1.2. Planeación

Indicador	1 (Escala 1 – 9)	2 (0 – 100)	Observación
1.2.1. Apoyo institucional para esquemas descentralizados			
1.2.2. Interés de empresas de servicios en la administración, O&M			
1.2.3. Existencia de zonas periurbanas y de expansión sin cobertura en tratamiento de agua residual			
Total		100	

### 2. ASPECTO TECNOLÓGICO

#### 2.1. Características Tecnológicas

Indicador	1 (Escala 1 – 9)	2 (0 – 100)	Observación
2.1.1. Potencial de reuso			
2.1.2. Cobertura de alcantarillado			
2.1.3. Nivel de descentralización			
Total		100	

## 2.2. Características de la zona

Indicador	1 (Escala 1 – 9)	2 (0 – 100)	Observación
2.2.1. Disponibilidad de área			
2.2.2. Objetivos de calidad			
2.2.3. Distancia al punto de descarga			
2.2.4. Topografía de la zona			
Total		100	

## 2.3. Tipo de reuso

Indicador	1 (Escala 1 – 9)	2 (0 – 100)	Observación
2.3.1. Agricultura			
2.3.2. Acuicultura			
2.3.3. Urbanístico (riego de parque y zonas verdes), lavado de calles			
2.3.4. Recuperación de energía			
Total		100	

## 3. ASPECTO SOCIAL

### 3.1. Comunidad

Indicador	1 (Escala 1 – 9)	2 (0 – 100)	Observación
3.1.1. Aceptación de reuso			
3.1.2. Participación de la comunidad en administración, O&M del sistema			
Total		100	

### 3.2. Demografía

Indicador	1 (Escala 1 – 9)	2 (0 – 100)	Observación
3.2.1. Tamaño de población			
3.2.2. Densidad poblacional			
3.2.3. Distribución poblacional			
Total		100	

## 4. ASPECTO AMBIENTAL

### 4.1. Impacto Ambiental

Indicador	1 (Escala 1 – 9)	2 (0 – 100)	Observación
4.1.1. Reciclaje de nutrientes			
4.1.2. Disponibilidad de agua			
4.1.3. Producción de lodos			
4.1.4. Olor/ruido/insectos/afectación paisajística			
Total		100	