

## **IDENTIFICACIÓN DE TIPOLOGÍAS DE ASENTAMIENTO PARA EL DISEÑO DE TRATAMIENTO DESCENTRALIZADO DE AGUAS RESIDUALES. CASO DE ESTUDIO: SAN ISIDRO DE HEREDIA - COSTA RICA**

### **IDENTIFICATION OF SETTLEMENT TYPOLOGIES FOR THE DESIGN OF DECENTRALIZED WASTEWATER TREATMENT. CASE STUDY: SAN ISIDRO OF HEREDIA - COSTA RICA**

*Daniel Francisco Avendaño Leadem<sup>1</sup>*  
*Universidad Nacional de Costa Rica*

#### **RESUMEN**

El proyecto de Saneamiento Ambiental de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia tiene como objetivo tratar las aguas residuales que se generan en los cantones de Heredia, San Rafael y San Isidro de forma centralizada, sin embargo se ha topado con el problema de que ciertos asentamientos del cantón de San Isidro no podrán ser conectados directamente a la nueva red de alcantarillado sanitario. Partiendo de la eficiencia y la adaptabilidad de las diferentes alternativas de tratamiento, la presente investigación propone sistemas descentralizadas de tratamiento de aguas residuales para los asentamientos que lo requieran. La metodología contempla las variables de densidad y crecimiento poblacional, zonificación de uso del suelo, disponibilidad de espacio y cercanía a un cuerpo de agua

---

<sup>1</sup> Académico de la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA).  
Máster en Eficiencia de Recursos Aplicados en la Arquitectura y la Planificación. Correos electrónicos:  
davenda@una.cr, danavenda@gmail.com

Fecha de recepción: 06 de octubre del 2015  
Fecha de aceptación: 24 de noviembre del 2015

para clasificar los asentamientos en cuatro tipologías arquetípicas que comparten condiciones similares para facilitar la selección de alternativas descentralizadas de tratamiento para cada asentamiento.

**Palabras clave:** tipologías de asentamiento, aguas residuales, tratamiento descentralizado, saneamiento

#### **ABSTRACT**

The Environmental Sanitation Project of the Public Works Company of Heredia (ESPH, for its name in Spanish) aims at treating the wastewater being generated in the municipalities of Heredia, San Rafael and San Isidro in a centralized system. However, it has faced the problem that certain settlements in San Isidro cannot be connected directly to the proposed sewerage network. Based on the efficiency and adaptability of the different treatment alternatives, this research proposes decentralized wastewater treatment systems for the settlements that require them. The methodology considers the variables of population growth and density, land use zoning, spatial availability and closeness to a waterbody in order to classify the settlements into four archetypal typologies sharing similar conditions to facilitate the selection of decentralized treatment options for each settlement.

**Keywords:** settlement typologies, wastewater, decentralized treatment, sanitation

### **Introducción**

Por varios años el Programa Estado de la Nación ha advertido que Costa Rica presta poca atención a la falta de manejo de las aguas residuales, comprometiendo seriamente la sustentabilidad ambiental del país (Programa Estado de la Nación, 2013). En la actualidad, más del 70% de la población costarricense desecha las aguas residuales domésticas de forma precaria mediante métodos *in situ* tales como tanques sépticos casi siempre en mal estado o letrinas. Los efluentes provenientes de los tanques sépticos desechados sin tratamiento adecuado usualmente violan los estándares de vertido y por lo tanto están contaminando el suelo y los acuíferos superficiales. En algunos casos, las aguas residuales domésticas que provienen de la cocina, duchas, lavaderos y servicios sanitarios son vertidos en los sistemas de alcantarillado de aguas negras, los cuales a su vez son frecuentemente vertidos directamente a los ríos sin ningún tratamiento previo (Consejo Nacional de Planificación Urbana, 2013). Esta es una preocupación ambiental alarmante causada en un alto grado por la falta de manejo de las aguas residuales y de los mecanismos para hacer que las regulaciones sean más eficientes.

La situación no es más alentadora en la Provincia de Heredia en donde el sistema de aguas negras está por demás obsoleto y carece de un mantenimiento adecuado, lo que explica que las aguas negras sean vertidas directamente a ríos importantes. En un esfuerzo por mejorar estas

circunstancias, la Empresa de Servicios Públicos de Heredia, en adelante abreviada ESPH<sup>2</sup>, ha instalado gradualmente sistemas de aguas negras y ha comenzado la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales a pequeña escala. Sin embargo, aun y cuando estas alternativas han sido una solución para urbanizaciones más pequeñas, se requiere una solución más integral y regional para resolver el problema en general.

Conscientes del panorama actual, la ESPH está promoviendo el proyecto de Saneamiento Ambiental el cual se encuentra en la fase de viabilidad (incluyendo el diseño, la evaluación de impacto ambiental y los términos de referencias para la licitación correspondiente) para la construcción de dos nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales centralizadas para tratar las aguas de los cantones de Heredia, San Rafael y San Isidro. Dicho proyecto contempla una serie de actividades que incluyen la expansión y recuperación del sistema de aguas residuales, construcción de estaciones de bombeo, así como la construcción de dos plantas de tratamiento de aguas residuales de mayor tamaño. Dentro de los próximos 40 años, el proyecto pretende instalar aproximadamente 400 kilómetros de recolectores para posibilitar el transporte y tratamiento subsecuente de más de 100,000 m<sup>3</sup>/día de aguas residuales (ESPH, 2010).

El problema consiste en que ha surgido una dificultad anticipada en el diseño del abordaje centralizado de las plantas de tratamiento de aguas residuales propuesto por el proyecto. Se identificaron algunos asentamientos en el cantón de San Isidro de Heredia que no podrán conectarse directamente al sistema de alcantarillado sanitario debido a la fuerte variación en las condiciones de las pendientes y el alto costo de instalación de estaciones de bombeo para brindarle el servicio a un número reducido de hogares. Como resultado, se hace necesaria una propuesta de alternativas descentralizadas de tratamiento de aguas residuales.

En este contexto, el objetivo de la presente investigación no fue comprobar que los sistemas centralizados o descentralizados son uno mejor que el otro, sino más bien idear e implementar una metodología espacial sistemática desde la geografía aplicada para facilitar la propuesta de una serie de alternativas descentralizadas de tratamiento de aguas residuales que puedan ser incorporadas en un proyecto con un abordaje centralizado

---

2 ESPH - Empresa de Servicios Públicos de Heredia: administra el agua potable, la electricidad, el tratamiento de aguas residuales e impulsa la conservación ambiental en la Provincia de Heredia.

y que se complementen para resolver el problema del tratamiento deficiente de aguas residuales en los países en vías de desarrollo.

Aunque la investigación contempla la descripción de los sistemas descentralizados de tratamiento propuestos para cada tipología de asentamiento, así como un plan de implementación, el presente artículo se centra principalmente en dos aspectos: a) la metodología para identificar y definir las tipologías de asentamiento para facilitar la selección de alternativas de tratamiento para cada asentamiento que así lo requiera y b) proponer una alternativa descentralizada de tratamiento adaptable a las condiciones y requisitos de cada tipología.

### **Marco teórico – conceptual**

**Alternativas de tratamiento de aguas residuales.** El proyecto de Saneamiento Ambiental se basa en un enfoque centralizado de manejo de aguas residuales que consiste en un amplio sistema de aguas negras que recoge aguas residuales de muchas fuentes generadoras (viviendas, áreas comerciales, plantas industriales e instituciones) y las transporta a una planta de tratamiento centralizada y luego desecha el efluente tratado (Crites & Tchobanoglous, 1998). Este abordaje mediante el sistema de tratamiento centralizado requiere una inversión importante, ya que su construcción es costoso y requiere conocimiento técnico para su manejo y operación (Wilderer & Schreff, 2000).

Por su parte, el enfoque descentralizado emplea un sistema de tratamiento *in situ* que contempla la combinación de tecnologías mediante las cuales se da el manejo, recolección, tratamiento y desecho de las aguas residuales cerca de su punto de su generación (Parkinson & Tayler, 2003; Seidenstat et al, 2003). El mismo se diseña para operar en barrios o comunidades de menor escala y baja densidad, pudiéndose adaptar a condiciones desfavorables como en áreas de topografía adversa (EPA, 2004).

En lo concerniente a la sostenibilidad, los sistemas descentralizados de manejo de aguas residuales permiten la implementación de tecnologías simples y su manejo es altamente flexible, motivo por el cual se convierten en una solución fiable a largo plazo y rentable para comunidades pequeñas (Massoud et al, 2009). Cuando son gestionadas

de manera eficiente, los sistemas descentralizados promueven el retorno de agua residual tratada dentro de la cuenca de origen y pueden ser instalados en base a necesidad, evitando la costosa implementación de sistemas de tratamiento centralizados de mayor tamaño (EPA, 2005; Marsalek, 2010). Como resultado, el manejo descentralizado de aguas residuales está siendo considerado progresivamente porque es menos intensivo a nivel de recursos y una forma más ecológicamente sostenible de saneamiento (Massoud et al, 2009).

**Tipologías de asentamiento.** La investigación en espacios urbanos y periurbanos aborda temas complejos e interdisciplinarios para los cuales se requieren enfoques multidimensionales y multivariados, especialmente cuando se trata de aspectos relacionados con el desarrollo sostenible tal como el tratamiento descentralizado de aguas residuales. Por lo tanto, como en otros campos de la investigación ambiental y geografía aplicada, los enfoques lineales generalmente no son apropiados para estructurar una realidad compleja, particularmente si lo que se busca son opciones para la toma de decisiones y la acción a nivel de micro-escala (de Haan, Lantermann, Linneweber, & Reusswig, 2001).

La investigación por medio de tipologías proporciona un enfoque multidimensional que logra estructurar un conjunto de datos de acuerdo a las preguntas de investigación específicas. Por lo tanto, estas tipologías pueden ser definidas desde una perspectiva teórica con base en consideraciones conceptuales o desde una perspectiva práctica con base en la experiencia (Blum & Gruhler, 2001). Comúnmente en el caso de investigaciones con objetivos y diseños de investigación complejos se adopta un enfoque combinado que a menudo conduce a la identificación y propuesta de lo que se llama “tipologías construidas” (Kluge, 1999).

En la investigación espacial, el enfoque de tipologías se utiliza para describir, modelar, analizar, comparar y monitorear el entorno construido con respecto a la estructura urbana, infraestructura y edificios. El concepto de tipología generalmente se refiere a ciertas categorías espaciales, en éste caso de asentamientos, que comparten condiciones similares en las cuales la ocurrencia situacional de las dinámicas espaciales pueden ser ilustradas con base en escenarios arquetípicos (Rain, 2007).

## **Métodos y materiales**

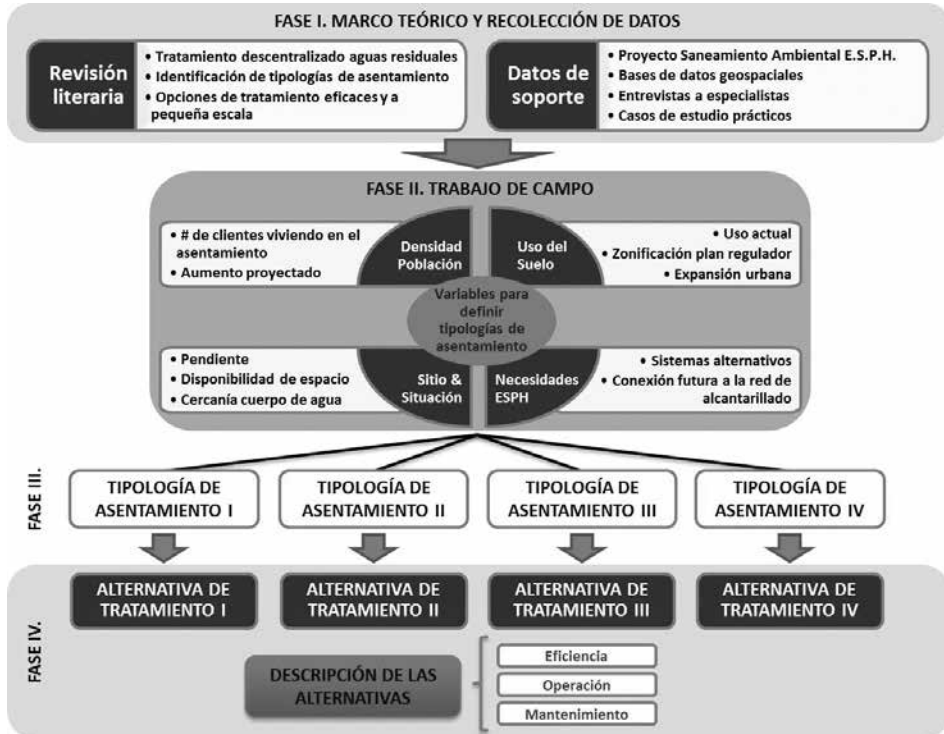
**Enfoque científico.** La investigación estuvo motivada empíricamente con el propósito de brindar soluciones técnicas y sustentables al problema de manejo de aguas residuales en Costa Rica. La misma se desarrolló desde el enfoque científico de la geografía aplicada, la cual, desde un punto de vista general, puede ser definida como la implementación de conocimientos, destrezas y herramientas geográficas para la resolución de problemas de índole social, económico y/o ambiental (Pacione, 2011). De esta forma, la presente investigación parte de la geografía como ciencia aplicada no solo para generar nuevo conocimiento en un campo transcendental para Costa Rica como lo es el tratamiento descentralizado de aguas residuales, sino también para aplicar este conocimiento a las acciones mediante las cuales se obtienen soluciones apropiadas y sostenibles a dicha problemática. En este sentido, los conceptos y la praxis desarrollados en la presente investigación “llevan al cumplimiento de determinados procedimientos tendientes a la producción de conocimientos científicos que a su vez, en el caso de la geografía aplicada, resulten de utilidad para la resolución de problemáticas de índole espacial” (Buzai, Baxendale, & Cruz, 2010, pág. n/d).

**Área de estudio.** El área de estudio de la investigación se centró en el cantón de San Isidro, el cual se localiza en la Provincia de Heredia, Costa Rica. Esto fue acordado con la ESPH en vista de que éste es el área del proyecto de Saneamiento Ambiental que presenta un mayor número de asentamientos que no podrán ser conectados al sistema centralizado de aguas negras por las razones anteriormente descritas. El cantón de San Isidro se localiza en las coordenadas 10°01'00 Norte y 84°03'00 Oeste. Tiene una superficie total de 26,96 km<sup>2</sup>; una población de 18.127 (Según el censo INEC, 2012); una densidad de población de 672 hab/km<sup>2</sup>; altitud media de 1360m sobre el nivel medio del mar; una precipitación anual de 2.500 mm/año y una temperatura promedio que oscila entre los 16 y 25°C.

**Modelo de investigación.** Según se observa en el modelo propuesto, la investigación fue dividida en seis fases para facilitar la ejecución de la misma (Figura 1). Como se mencionó anteriormente, el presente artículo solo contempla las primeras 3 fases de la investigación y solo hace una breve referencia a las alternativas descentralizadas de tratamiento

propuestas. La descripción detallada de dichas alternativas (fase 4), así como el plan de implementación propuesto (fase 5) se pueden consultar en Avendaño (2014).

**Figura 1. Modelo de investigación**



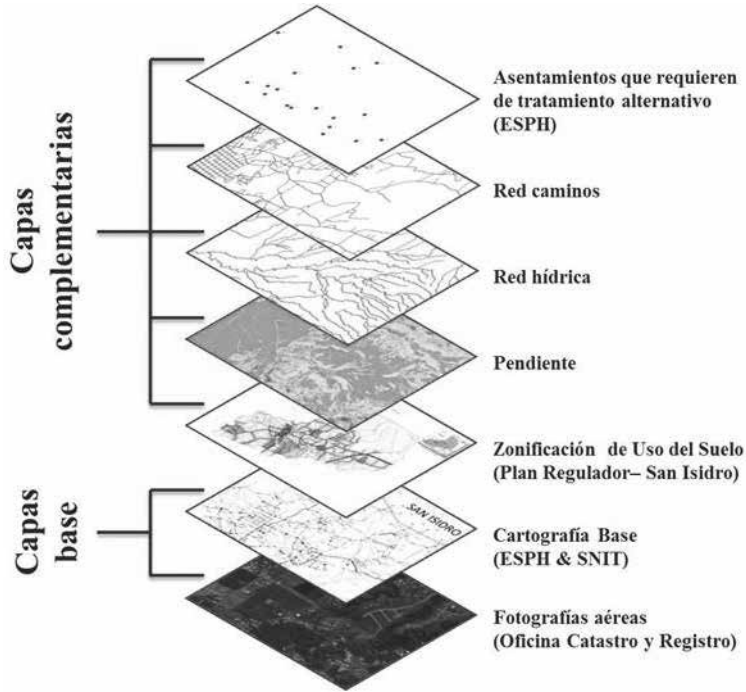
Fuente: elaboración propia

La *Fase I* de esta investigación, consistió en formular el marco teórico para dar soporte y justificar la investigación. Las principales temáticas exploradas en la revisión de literatura fueron: tratamiento descentralizado de aguas residuales, identificación de tipologías de asentamiento y opciones eficientes de tratamiento de aguas residuales a pequeña escala. Esta etapa también incluyó la recopilación de toda la información soporte del proyecto de Saneamiento Ambiental de la ESPH y la entrevista a especialistas de esta institución a efectos de obtener un resumen del diseño del proyecto. Se obtuvieron conjuntos de datos geospaciales de la ESPH



y del Sistema Nacional de Información Territorial - SNIT (Figura 2). Se revisaron casos de estudio prácticos a efectos de obtener el conocimiento sobre cómo aplicar y distinguir en el abordaje de la presente investigación cualquier experiencia relevante.

**Figura 2.** Conjuntos de datos geoespaciales utilizados para realizar análisis espaciales



Fuente: elaboración propia

La fase de trabajo de campo o *fase II*, consistió en visitar el área de estudio a efectos de recolectar la información necesaria. Los resultados obtenidos en esta fase fueron muy importantes para determinar las tipologías de asentamientos. Para completar esta fase de forma efectiva, el trabajo de campo fue diseñado en cuatro categorías, cada una de acuerdo a las variables a examinar. Como resultado, la primera categoría correspondió a los requerimientos de la ESPH en cuando a su interés y necesidades en esta investigación; en otras palabras, proponiendo alternativas de unidades de plantas de tratamiento de aguas residuales en el área de estudio



y determinando la posibilidad de conectarlas al sistema de aguas negras en el futuro. La segunda categoría se relacionó con los asuntos de uso de suelo tales como uso del suelo actual, la zonificación establecida en el plan regulador del cantón, así como la expansión urbana proyectada. Las variables geográficas y las condiciones del sitio corresponden a la tercera categoría, la cual incluye: variación de pendiente, cercanía a cuerpos de agua (ríos, arroyos, entre otros) así como la disponibilidad de espacio para poder ubicar las futuras plantas de tratamiento alternativas a pequeña escala (descentralizadas). La última categoría está relacionada con la densidad poblacional de cada uno de los asentamientos, lográndose determinar el número actual de viviendas y el crecimiento esperado.

La recopilación de los datos necesarios y la exploración llevada a cabo en las etapas anteriores permitieron el análisis y la realización de los procesos de discusión requeridos para cumplir los objetivos de esta investigación. En este sentido la *fase III* del modelo de investigación corresponde a la definición de las tipologías de asentamientos que sirven de base para el resto de la investigación. En la *fase IV* se evalúan las tecnologías de tratamiento a efectos de proponer una para cada tipología de asentamiento y se describen sus respectivas características y eficiencia en el tratamiento. A continuación se detalla el procedimiento del desarrollo de estas últimas etapas.

**Definición de las tipologías de asentamiento.** El abordaje para definir las tipologías de asentamiento fue considerado en esta investigación como una manera de facilitar la selección de alternativas al tratamiento de aguas residuales para cada asentamiento y no abundar en una investigación extensa que resultara en detalles innecesarios. Las tipologías identificadas se basaron en asentamientos que habían sido identificados como áreas que no estarían conectadas al sistema de alcantarillado y tratamiento de aguas negras propuesto por el proyecto de Saneamiento Ambiental. La explicación detrás de esto es que están localizados en áreas con pendientes pronunciadas que requerirían la instalación de estaciones de bombeo de alto costo para brindarle el servicio a un número reducido de viviendas.

Según se observa en el modelo de investigación, las variables utilizadas para definir estas tipologías fueron agrupadas en cuatro categorías: densidad de población, el sitio y situación de cada localidad, el uso del suelo así como los requerimientos previamente establecidos por parte de la ESPH. En lo relativo a la densidad poblacional, las variables consideradas

fueron el crecimiento previsto del asentamiento y -particularmente- el número actual de viviendas ubicadas en cada asentamiento. Determinar estas características fue crucial para obtener la cantidad de aguas residuales que son generadas, subsecuentemente facilitando la decisión sobre cuál alternativa de tratamiento proponer. Estas variables fueron identificadas directamente en el campo y por medio de observación de imágenes de satélite mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG), así como mediante consulta al censo poblacional más reciente.

Las variables de sitio y situación consideradas en cada asentamiento fueron la pendiente, disponibilidad de espacio y cercanía a cuerpos de agua (necesarias para la descarga del agua tratada). El atributo de la pendiente fue inicialmente considerado como una de las principales razones para identificar los asentamientos que requerían un método alternativo de tratamiento de aguas residuales. De hecho, San Isidro es el área del proyecto de Saneamiento Ambiental con más locaciones que no podrán ser conectadas al sistema de aguas negras puesto que tienen condiciones topográficas variables en un área reducida, incluyendo varias elevaciones y cañones de río. La variable de disponibilidad de espacio está relacionada a si existe o no suficiente espacio para ubicar una planta de tratamiento de aguas residuales. Es importante apuntar que esta variable no se refiere a un espacio en particular, sino más bien a un sitio localizado en la menor altitud posible para que las aguas residuales puedan fluir por la pendiente aprovechando la gravedad. Junto con la variable de cercanía a un cuerpo de agua, esta fue una de las condiciones especiales que influenciaron la definición de las tipologías. La identificación de cuerpos de agua cercanos fue importante para determinar si los efluentes resultantes del tratamiento de las aguas residuales pueden ser descargados ahí o si debe proponerse una alternativa distinta. La determinación de estas variables fue posible mediante la observación directa en el campo y el análisis espacial llevado a cabo mediante la implementación de SIG, para lo cual se utilizaron imágenes aéreas y satelitales, mapas topográficos y datos geoespaciales obtenidas del SNIT.

Las características de uso de suelo consideradas para determinar las tipologías de asentamiento fueron el uso del suelo actual, la zonificación de uso propuesta por el plan regulador del cantón de San Isidro de Heredia, así como la proyección de la expansión/crecimiento. De la observación de

estas características en el campo y por medio del análisis espacial llevado a cabo con la implementación de SIG, fue posible verificar las tendencias en el uso del suelo y los lugares en los cuales el cantón ha planificado expansiones futuras. Estas condiciones son importantes para esta investigación a efectos de determinar el tamaño, ubicación y características de la alternativa de tratamiento de aguas residuales a proponer.

**Evaluación de las alternativas descentralizadas de tratamiento de aguas residuales.** Si bien existe una amplia variedad de sistemas de tratamiento de aguas residuales que pueden ser adecuados para ciertas características de los asentamientos, ninguna de estas tecnologías es específica y exclusiva para los países en vías de desarrollo (Massoud et al, 2009). Por lo tanto, la selección de una tecnología apropiada de tratamiento de aguas residuales descentralizada para cada tipología de asentamiento estuvo basada en la revisión de literatura, la exploración de casos de estudio comparables, así como las discusiones y entrevistas con distintos especialistas. Como experiencia práctica se examinaron los trabajos de la Asociación Bremense de Investigación y Desarrollo de Ultramar (BORDA, 2012) y del proyecto Gestión de Agua y Saneamiento Sostenible en Latinoamérica (SSWM, 2013), quienes desarrollaron proyectos importantes en lugares con condiciones climáticas similares y que sirvieron de referencia para la presente investigación.

Los principales factores considerados durante la evaluación y selección de las tecnologías de tratamiento propuestas para cada tipología de asentamiento fueron: su eficiencia y grado de sustentabilidad (eliminación de contaminantes, requerimientos de energía y materiales, complejidad de manejo), así como su aplicabilidad a las condiciones de las tipologías identificadas. En términos generales, los factores considerados fueron: habilitados para cumplir con los parámetros de vertido establecidos por la legislación costarricense; funcionamiento apropiado en climas tropicales; posibilidad de ser instalados en espacios pequeños; y tener la posibilidad de ser expandidos para tratar incrementos potenciales en la cantidad de aguas residuales producto de la expansión futura de los asentamientos. Se puso un énfasis especial no sólo en las alternativas adecuadas a las condiciones de las diferentes tipologías, sino también en las opciones que fueran eficientes en cuanto a recursos (económicamente viables, que requieran menos energía, que causaran menos impacto y que alcanzaran el grado

adecuado de tratamiento de aguas residuales). Estas condiciones fundamentan la exclusión de ciertas tecnologías (ej. estanques de estabilización de residuos y tratamiento aeróbico) y el favorecimiento de otras (ej. tratamiento anaeróbico y humedales artificiales).

La tasa de eficiencia mínima de eliminación ( $E_r$ ) se usó como un indicador para evaluar las alternativas de tratamiento (Crites & Tchobanoglous, 1998). Se calcula con la fórmula que se muestra a continuación, en la que la cantidad inicial se refiere al valor del parámetro estudiado en el agua residual entrante y la cantidad de salida corresponde al valor del parámetro en el agua tratada. Solo las tecnologías que alcanzaron o sobrepasaron el  $E_r$  establecido según la legislación correspondiente fueron consideradas en la presente investigación.

$$E_r = \frac{\text{Cantidad inicial} - \text{Cantidad reducida}}{\text{Cantidad inicial}} \times 100\%$$

Según se observa en la Tabla 1, las tecnologías evaluadas como posibles alternativas a ser propuestas para cada asentamiento requirieron al menos una eficiencia en la tasa de eliminación del 60% de DBO (demanda biológica de oxígeno) y DQO (demanda química de oxígeno) y por lo menos de un 71% en el TSS (total de sólidos suspendidos). Antes de esta evaluación, se propuso una alternativa de tratamiento para cada tipología de asentamiento. Cada una de las alternativas se describió ilustrando las características específicas de cada escenario, tales como el diseño en la combinación de tecnologías a implementar para el tratamiento primario, tratamiento secundario y vertido de efluentes, entrada diaria de aguas residuales, flujo máximo en horas pico y eficiencia en las tasa de eliminación de los principales parámetros de tratamiento.

**Tabla 1.** Límites máximos permitidos de parámetros de tratamiento universales en aguas residuales

Parámetro <sup>3</sup>	Afluente <sup>4</sup> (entrante del sistema de aguas negras)	Efluente <sup>5</sup> (descarga después del tratamiento)	E <sub>r</sub> (tasa de eficiencia mínima de eliminación )
DBO	125 mg/L	50 mg/L	60%
DQO	372 mg/L	150 mg/L	60%
TSS	172 mg/L	50 mg/L	71%

Fuente: elaboración propia

## Resultados

**Tipologías de asentamiento identificadas.** Después de obtener la información necesaria con respecto a las variables seleccionadas y efectuar el correspondiente análisis espacial, fue posible definir cuatro distintas tipologías de asentamiento. La Tabla 2 es una versión resumida de las observaciones hechas durante el trabajo de campo y el análisis efectuado. Para efectos explicativos, sólo las variables más significativas observadas en cada asentamiento están representadas; estas fueron las más importantes durante la determinación de cada una de las tipologías (ej. cercanía a cuerpos de agua, disponibilidad de espacio, densidad de vivienda, categoría de uso de suelo de acuerdo al plan regulador y expansión/crecimiento futuro).

- 3 Los parámetros más importantes establecidos para el análisis de aguas residuales son DBO = demanda biológica de oxígeno; DQO = demanda química de oxígeno; TSS = total de sólidos suspendidos y temperatura.
- 4 Los parámetros totales de los afluentes son obtenidos de estudios llevados a cabo en la región de Heredia por expertos de la ESPH (E.S.P.H., 2010). Estos representan un promedio de los resultados en diferentes puntos de muestra, tomados durante la estación seca y lluviosa.
- 5 Los parámetros de efluentes establecidos por la legislación costarricense mediante Decreto N° 33601-S: Reglamento de Vertido y Reutilización de Aguas Residuales (MINAE, 2007).

**Tabla 2.** Caracterización de las tipologías de asentamiento

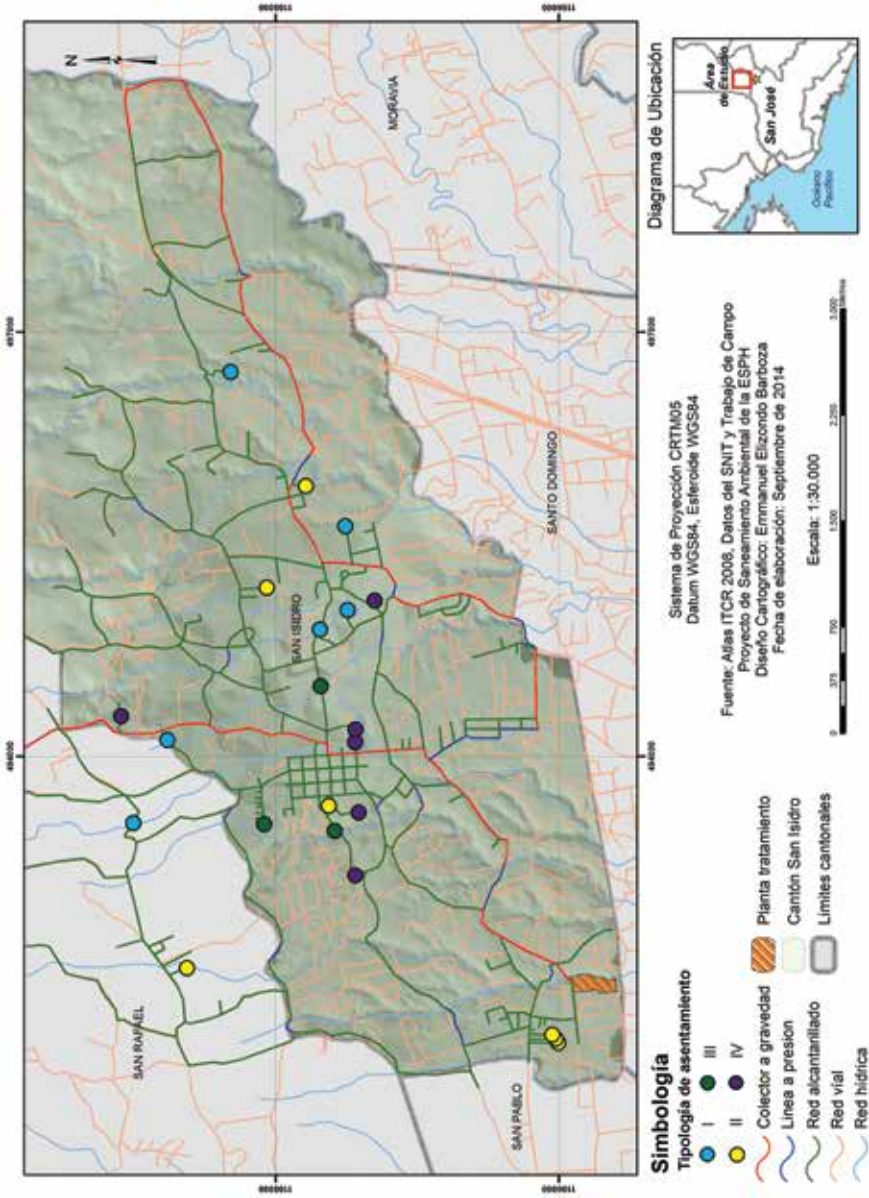
Tipología de asentamiento	Cercanía a cuerpo de agua	Disponibilidad de espacio	Densidad vivienda*	Zonificación uso del suelo según Plan Regulador	Expansión urbana futura
 I	✓	✓	Baja	Rural Concentrada	Posible
 II	X	X	Baja / Media	Residencial Comercial; Rural Concentrada; Expansión urbana	Posible/ Certera
 III	✓	✓	Alta	Rural Concentrada; Residencial Comercial	Posible/ Restringida
 IV	✓	X	Baja / Media	Rural Concentrada; Residencial Comercial	Posible/ Restringida

(\* Densidad de vivienda: Baja <25; Media 25-50; Alta >50)

Fuente: elaboración propia

El rango de densidad de vivienda establecido para efectos de esta investigación es bajo (menos de 25 viviendas), medio (de 25 a 50 viviendas) y alto (más de 50 viviendas). La posible expansión futura se refiere a un desarrollo potencial y/o crecimiento del asentamiento. Esta es una condición a tomar en consideración en el planeamiento del tratamiento de aguas residuales debido a que la cantidad de aguas negras a tratar puede variar en el tiempo. Esta variable está dividida en tres categorías: restringida (no hay espacio para expansiones futuras y/o hay restricción en el plan regulador; posible (el espacio para expansiones futuras es limitado y/o restringido por el plan regulador) y certera (sí existe espacio para futuras expansiones y la misma es contemplada en el plan regulador).

Figura 3. Mapa de localización de las tipologías de asentamiento



Fuente: Elaboración propia con el diseño cartográfico de Emmanuel Elizondo Barboza



La tipología I se compone de asentamientos con baja densidad de vivienda ubicadas en áreas clasificadas según la zonificación de uso de suelo del plan regulador como “rural concentrado”. Esto significa que son áreas de crecimiento lineal que se han desarrollado fuertemente durante los últimos años. Presentan un tamaño de propiedad mínimo bastante alto y restringen el comercio y las áreas de servicio para que estas áreas se puedan consolidar con una densidad de viviendas baja (Municipalidad de San Isidro de Heredia, 2005). En otras palabras, estas son áreas que sufrirán escaso crecimiento poblacional y un uso diversificado del suelo.

Las anteriores características también dan una indicación hacia la disponibilidad de espacio, la cual en esta tipología no es una restricción para la ubicación de una planta de tratamiento de aguas residuales descentralizada y permitiría su expansión futura en caso de que fuera necesario. Los asentamientos que componen esta tipología también están cerca de un cuerpo de agua con suficiente caudal para recibir las descargas de la planta respectiva.

Los asentamientos agrupados bajo la tipología II muestran una densidad de viviendas de baja a media, indicando que tienen menos de 50 casas. De conformidad con la zonificación de uso de suelo del plan regulador de San Isidro, estos asentamientos se ubican en dos categorías diferentes: residencial-comercial y de expansión urbana. La categoría “residencial-comercial” se refiere a áreas residenciales combinadas con componentes comerciales aislados (necesidades básicas) que no interrumpen el uso residencial dominante. Estas áreas tienen un tamaño de área de propiedad mínimo para permitir la baja densidad de viviendas y para evitar la expansión irregular de los centros urbanos que lo rodean y la creación de derechos de paso informales. Sólo un asentamiento está situado en la categoría de “expansión urbana”. Esta área está básicamente libre de edificios/construcciones y cercana a centros urbanos, brindando las cualidades necesarias para la absorción de eventuales crecimientos de población o asentamiento. Para estas zonas el plan regulador de San Isidro establece tamaños propiedad más altas y utiliza restricciones con la intención de dar prioridad a las áreas residenciales de uso comercial concentrado (Municipalidad de San Isidro de Heredia, 2005).

Las categorías de uso de suelo antes mencionadas sugieren una mayor disponibilidad de espacio y teóricamente hablando, la posibilidad o incluso certeza de una expansión futura. Sin embargo, el hecho es que las observaciones de campo y el análisis espacial mostraron que los asentamientos

agrupados bajo esta tipología presentan menos disponibilidad de espacio para la ubicación de una planta de tratamiento. Esto seguramente obligará a instalar la planta de tratamiento bajo la calle pública. Otra restricción de esta tipología es la falta de un cuerpo de agua en los alrededores. A diferencia de las otras tipologías, esto significa que se debe proponer una alternativa diferente para la descarga del efluente resultante del proceso de tratamiento.

A diferencia de otras categorías, los asentamientos pertenecientes a la tipología III presentan una densidad de viviendas más alta. Esta es una característica importante a señalar al escoger la alternativa de tratamiento, ya que la misma debe estar diseñada para recibir y tratar grandes cantidades de agua residual. La densidad de las viviendas de esta tipología es de 50 o más, con poca probabilidad de expansión futura. Los asentamientos de la tipología III son generalmente conglomerados de viviendas o conjuntos residenciales con espacio suficiente para ubicar una planta de tratamiento y un cuerpo de agua cercano para descargar los efluentes resultantes. Es importante señalar que el espacio disponible para la instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales en algunos asentamientos de esta tipología se encuentra al lado de la vía, lo cual significa que existe la probabilidad de que se requieran estudios adicionales sobre la idoneidad del terreno y permisos respectivos.

Las categorías de uso de suelo presentes en esta tipología son “rural concentrado” y “residencial/comercial mixto”. Estas circunstancias, descritas en detalle anteriormente, apuntan a asentamientos con poco crecimiento poblacional y diversificación del uso del suelo, evitando en consecuencia una expansión irregular de la urbanización y los caminos de comunicación informales.

La tipología IV presenta condiciones similares a la tipología III ya que ambas incluyen las mismas categorías de uso de suelo de conformidad con el plan regulador del cantón, ambas están cerca de cuerpos de agua y ambas tienen probabilidad de expansión futura. Las diferencias principales residen en las variables de densidad de viviendas y disponibilidad de espacio. La densidad de viviendas de los asentamientos de la tipología IV varía de baja (menos de 25 viviendas) a media (entre 25 a 50 casas). La disponibilidad de espacio para la instalación de una planta de tratamiento es muy reducida en estos asentamientos, significando ya sea que deberán ser colocadas bajo la vía como en la tipología III o al lado del camino.

**Propuesta de alternativas descentralizadas de tratamiento de aguas residuales.** En base a las características de las tipologías de los asentamientos previamente definidas, se llevó a cabo una evaluación del tratamiento de aguas residuales. Esta selección se llevó a cabo considerando características como: habilidad para cumplir con los parámetros de vertidos establecidos por la legislación costarricense; comprobación de que es una tecnología adecuada para climas tropicales; posibilidad de ser instalado en espacios reducidos; y poder ser ampliado para tratar incrementos potenciales en las cantidades de aguas residuales debido a expansión futura. En este sentido, el siguiente paso de la investigación fue determinar precisamente cuál tipo de tecnología es considerada la más apropiada para cada una de las cuatro tipologías de asentamiento.

Es importante señalar que si bien las aguas residuales descentralizadas pueden tener hasta tres niveles de tratamiento, únicamente los niveles primario y secundario fueron considerados en la presente investigación ya que en muchos casos es suficiente combinar tecnologías y/o componentes de uno o dos niveles de tratamiento siempre y cuando se alcancen los parámetros de calidad de efluente establecidos por la legislación (Crites & Tchobanoglous, 1998; Tchobanoglous, et al, 2003; Gutterer et al 2009).

De las tecnologías de tratamiento primario evaluadas (trampa de grasa/desarenador, tanque séptico, digestor anaeróbico mezclado, tanque Imhoff), el tanque séptico es la que se considera idónea para ser implementada en las tipologías de asentamiento. Las razones de esto son su aplicabilidad en las cuatro tipologías (I, II, III y IV); presenta bajos requerimientos de mantenimiento; puede ser colocado bajo tierra (una característica importante debido a la falta de espacio en muchos de los asentamientos; no requiere arreglos especiales previos a su implementación; puede ser integrado sin dificultad a la tecnología de tratamiento secundario; lleva acabo la eliminación inicial de DQO y de acuerdo a las experiencias de varios especialistas, no sólo es una buena opción para tratamiento primario en países en desarrollo con clima tropical, sino que es eficiente en cuanto a los recursos por los bajos costos, la fácil instalación y el bajo nivel de complejidad.

De las tecnologías examinadas para efectuar el tratamiento secundario (reactor anaerobio con deflectores - ABR<sup>6</sup>, filtro anaeróbico, humedales artificiales con flujo sub superficial horizontal - HSSF, reactor anaerobio

6 Por sus siglas en inglés.

de flujo ascendente - UASB, y la unidad de tratamiento aeróbico de crecimiento suspendido - SGATU), se determinó que dos tecnologías son las más apropiadas para su implementación como opciones al tratamiento en las tipologías de asentamiento.

La primera es el reactor anaerobio desconcertado (RAD), seleccionado porque es aplicable a las tipologías de asentamiento II, III y IV, ya que es apropiado para áreas en las cuales la disponibilidad de tierra es una limitación puesto que el tanque de tratamiento es instalado bajo tierra y no produce problemas de olor a los barrios circunvecinos. Su tamaño puede ser adaptado para tratar aguas residuales con densidades bajas, medias o altas y logra tasas altas de eficiencia en la eliminación: 70-95% de reducción DBO y 65-90% de reducción DQO (tasas mínimas deben ser de al menos 60% en ambos casos). Aunque el ABR no operará a una capacidad completa por 3 a 6 meses, este factor se puede superar añadiendo lodo activado al tanque a efectos de que la iniciación del proceso de tratamiento pueda ser acortado a pocas semanas. De conformidad con experiencias de especialistas, si se complementa con un tanque séptico, el ABR ha probado ser una de las opciones más sostenibles para el tratamiento de aguas residuales en los países en desarrollo porque es rentable, no requiere corriente, tiene bajos costos de mantenimiento (básicamente destaqueo), puede ser ensamblado con materiales locales y tiene servicio de por vida.

La segunda tecnología considerada apropiada para la implementación como opción de tratamiento de aguas residuales en la tipología de asentamiento es el humedal artificial con flujo sub superficial horizontal (HSSF), el cual fue seleccionado por su aplicabilidad en la tipología I, ya que es apropiado para áreas con disponibilidad de espacio, cercanas a cuerpos de agua en donde los efluentes se pueden descargar y presenta baja densidad de viviendas. Este tipo de humedal artificial también se ha propuesto como alternativa puesto que logra una eliminación alta de DBO, sólidos suspendidos y tasa de reducción de patógenos, actuando de conformidad con los parámetros oficiales permitidos. La reducción de DQO no es tan alta como en otras tecnologías, pero si se combina con un tanque séptico en una etapa anterior (tratamiento primario) sus resultados son suficientes para cumplir con los parámetros establecidos. Aunque el humedal artificial requiere mantenimiento permanente, los vecinos de los asentamientos circunvecinos pueden ser capacitados para realizar esta supervisión y realizar tareas simples

de mantenimiento. De conformidad con experiencias de especialistas, aunque esta tecnología requiere diseño y construcción por parte de expertos, es rentable debido a que puede ser construida y reparada con materiales locales y no requiere electricidad. También es ventajosa desde una perspectiva ambiental debido a que utiliza procesos naturales que involucran vegetación, suelos y grupos microbianos asociados para asistir en el tratamiento de aguas residuales, los cuales también sirven para atraer la biodiversidad y embellecer el asentamiento en el cual se ubica.

Otras tecnologías evaluadas para el tratamiento secundario fueron rechazadas como posibles opciones debido a varias razones. Aunque el filtro anaeróbico ejecuta un proceso similar al ABR y puede ser instalado bajo tierra, sus desventajas no pueden ser superadas y por esto no es apropiado para la tipología de los asentamientos. Estas desventajas incluyen: una reducción menor de DBO que la del ABR, un tiempo de inicio alto para el proceso de tratamiento (6-9 meses), requiere tratamiento adicional para ser descargado en un cuerpo de agua o un sistema alternativo de descarga, procesos de destaqueo poco seguros y efluentes con olores fuertes. Las dos opciones restantes los UASB y los SGATU fueron rechazadas como posibles opciones ya que requieren equipo de muy alto costo, consumo de energía, supervisión especializada permanente y no cumple con las condiciones de las tipologías de asentamiento ya que no pueden ser instalados completamente bajo tierra y pueden molestar a los vecinos debido al ruido que producen.

Según se estableció previamente, una de las características de la tipología II, es que no están cerca de un cuerpo de agua y por lo anterior requieren una alternativa para la descarga del efluente del proceso de tratamiento de las aguas residuales. Tomando esto en consideración, cuatro opciones diferentes fueron revisadas en busca de una posible solución: tanques de retención, pozos de infiltración, zanjas de absorción y camas de absorción. La alternativa de pozos de infiltración resultó ser la más apropiada para su implementación en la tipología de asentamientos II, ya que requiere poco espacio, es instalada bajo tierra, requiere poco mantenimiento y puede ser instalada en áreas con alta pendiente. Las otras opciones fueron descartadas porque requieren más espacio (tal es el caso de las zanjas de absorción y camas de absorción) o porque sólo son útiles como solución temporal (tanques de retención).

Luego de considerar los criterios de costo-eficiencia, adaptabilidad a las condiciones de las tipologías de asentamiento, eficiencia de eliminación ( $E_p$ ), sostenibilidad integral y cuentas de expertos, estas son las tecnologías descentralizadas de aguas residuales recomendadas para la implementación en las tipologías de asentamientos del cantón de San Isidro:

**Tabla 3.** Tecnologías de tratamiento propuestas para cada tipología de asentamiento

Tipología	Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Medio de eliminación
I	Tanque séptico	Humedales artificiales con flujo sub superficial horizontal	Descarga en río
II	Tanque séptico	Reactor anaerobio desconcertado	Pozo de infiltración
III	Tanque séptico	Reactor anaerobio desconcertado	Descarga en río
IV	Tanque séptico	Reactor anaerobio desconcertado	Descarga en río

Fuente: Elaboración propia.

### Conclusiones

El tratamiento de aguas residuales en Costa Rica y la mayoría de países en vías de desarrollo está siendo pasado por alto por parte de las autoridades públicas y en consecuencia dichas aguas están contaminando aguas superficiales y subterráneas, produciendo un impacto negativo en los ecosistemas, la salud pública y los paisajes. En Costa Rica, los procesos de toma de decisiones cruciales han sido pospuestos y el país no tiene una visión o política clara hacia una solución integrada al problema de manejo de aguas residuales.

El proyecto de Saneamiento Ambiental de la E.S.P.H propone una solución a esta problemática, sin embargo ha sido confrontado con el problema de que existen ciertos asentamientos del cantón de San Isidro de Heredia que no podrán estar conectados directamente al nuevo sistema de alcantarillado sanitario propuesto. Partiendo del enfoque de la geografía aplicada y utilizando la herramienta de SIG, la presente investigación implementó una metodología para facilitar la solución a dicha problemática desde una perspectiva espacial y propone alternativas de tratamiento de aguas residuales descentralizadas que fuesen eficientes, sostenibles y adaptables a las condiciones imperantes.

El abordaje escogido fue el de clasificar los asentamientos que presentaban la problemática en tipologías arquetípicas que compartieran condiciones y dinámicas espaciales similares. Esto evitó la realización de investigaciones extensas innecesarias y facilitó la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales. Lo anterior se logró mediante el análisis espacial realizado por medio de SIG y complementado mediante trabajo de campo. La clasificación de los asentamientos se basó en categorías de variables que incluyeron: densidad de población, sitio y situación, uso de suelo, así como directrices estipuladas por la ESPH. El resultado de este proceso fue el establecimiento de cuatro distintas tipologías de asentamiento.

Las categorías identificadas fueron: tipología I (localizada cerca de un cuerpo de agua con espacio suficiente para localizar la planta de tratamiento de aguas residuales, baja densidad habitacional en un área rural concentrado y posible expansión del asentamiento en el futuro); tipología II (no tiene un cuerpo de agua cercano ni espacio suficiente para ubicar una planta de tratamiento, densidad habitacional baja/media en una zona residencial comercial y posible expansión futura del asentamiento); la tipología III (se localiza cerca de un cuerpo de agua con espacio para localizar una planta de tratamiento al lado del camino, alta densidad poblacional en una zona rural concentrada y/o zona residencial-comercial y una expansión futura del asentamiento posible y/o restringida); y la tipología IV (se localiza cerca de un cuerpo de agua pero sin espacio suficiente para ubicar una planta de tratamiento, densidad poblacional baja/media en una zona rural concentrada y/o zona residencial-comercial y una expansión futura del asentamiento posible y/o restringida). En el caso de San Isidro, cinco asentamientos fueron clasificados bajo la tipología I, seis bajo la tipología II, tres bajo la tipología III y seis bajo la tipología IV. Para cada una de las tipologías de asentamiento se propuso una alternativa descentralizada de tratamiento de aguas residuales.

La intención general de esta investigación no fue comprobar si las tecnologías de tratamiento centralizadas o descentralizadas de aguas residuales son una mejor que la otra, sino más bien idear e implementar una metodología espacial sistemática desde la geografía aplicada para facilitar la propuesta de una serie de alternativas descentralizadas adecuadas a las condiciones específicas del territorio. De esta forma la investigación sirve de complemento a un proyecto de mayor tamaño que emplea una estrategia centralizada y en conjunto resolver el deficiente tratamiento de aguas



residuales en el cantón de San Isidro. A efectos de que lo anterior sea exitoso en Costa Rica y aplicable en el contexto de otros países, se requiere el apoyo de una estrategia creadora de capacidades basada en el desarrollo de políticas apropiadas, fortalecimiento institucional y entrenamiento adecuado.

## Referencias

- Avendaño Leadem, D. (2014). Decentralized wastewater treatment in different types of settlements in developing countries - Case study San Isidro de Heredia, Costa Rica (Tesis presentado para optar por el grado de maestría en Eficiencia de Recursos Aplicados en la Arquitectura y la Planificación.). HafenCity Universität, Hamburgo, Alemania.
- Blum, A., & Gruhler, K. (2001). Typologies of the built environment and the example of urban vulnerability assessment. En B. Müller, German Annual of Spatial Research and Policy 2010. Urban Regional Resilience: How do cities and regions deal with change? Berlin: Springer.
- BORDA. (2012). An innovative & rapidly installable solution to improve hygiene and health in emergency situations. Bremen, Germany: Bremen Overseas Research and Development Association.
- Buzai, G., Baxendale, C., & Cruz, M. (2010). Fases de un proyecto de investigación en estudios de geografía aplicada basados en el uso de Sistemas de Información Geográfica. En G. Buzai, Geografía y Sistemas de Información Geográfica: Aspectos conceptuales y aplicaciones (pág. n/d). Luján: Universidad de Luján. Consultado en línea <http://www.gesig-proeg.com.ar/documentos/libros/libro-13/CAPITULO-08.pdf>
- Consejo Nacional de Planificación Urbana. (2013). Plan GAM 2013. San José, Costa Rica: Secretaría Plan Nacional de Desarrollo Urbano.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (1998). Small and Decentralized Wastewater Management Systems. Boston: McGraw-Hill.
- De Haan, G., Lantermann, E., Linneweber, V., & Reusswig, F. (2001). Typenbildung in der sozialwissenschaftlichen Umweltforschung. Berlin: Springer.
- EPA. (2004). Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency: Office of Wastewater Management and Office of Water.

- EPA. (2005). Handbook for Managing Onsite and Clustered (Decentralized) Wastewater Treatment Systems. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency: Office of Water.
- ESPH. (2010). Estudio de Factibilidad para el Alcantarillado Sanitario y Tratamiento de Aguas Residuales para los Cantones de Heredia, San Rafael y San Isidro, y Diseño de la Primera Etapa de Construcción. Heredia, Costa Rica: CACISA - GIA.
- Gutterer, B., Sasse, L., Panzerbieter, T., & Reckerz, T. (2009). Decentralised wastewater treatment systems (DEWATS) and sanitation in developing countries. Leicestershire, UK: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), Loughborough University, UK, in association with Bremen Overseas Research (BORDA), Germany.
- INEC. (2012). X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda - 2011: Resultados generales. San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- Kluge, S. (1999). Empirisch begründete Typenbildung: Zur Konstruktion von Typen und Typologien in der qualitativen Sozialforschung. Berlin: Springer.
- Marsalek, J. (2010). Strategies for enhancing sustainability of urban water systems. In P. Hlavinek, I. Winkler, J. Marsalek, & I. Mahrikova, *Advanced Water Supply and Wastewater Treatment: A Road to Safer Society and Environment* (pp. 3-12). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Massoud, M., Tarhini, A., & Joumana, N. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 90, 652–659.
- MINAE. (19 de Marzo de 2007). Decreto N° 33601-S: Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales. *Diario Oficial La Gaceta*.
- Municipalidad de San Isidro de Heredia. (2005, 15 Diciembre). Reglamento de Zonificación - Plan Regulador Cantonal. *Diario Oficial La Gaceta*, pp. 42-63.
- Pacione, M. (2011). Applied geography: principles and praxis. *Hrvatski geografski glasnik*, 73 (1), 7 – 28.
- Parkinson, J., & Tayler, K. (2003). Decentralized wastewater management in peri-urban areas in low-income countries. *Environment & Urbanization*, 15, 75-90.

- Programa Estado de la Nación. (2013). Decimonoveno Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.
- Rain, D. (2007). Towards settlement science: a research agenda for urban geography. *GeoJournal*, 69, 1-8.
- Seidenstat, P., Haarmeyer, D., & Hakim, S. (2003). *Reinventing Water and Wastewater Systems: Global Lessons for Improving Water Management*. New York: Wiley.
- SSWM. (2013, Diciembre 20). Sustainable Sanitation and Water Management. Consultado en línea <http://www.sswm.info/category/implementation-tools/wastewater-treatment/hardware/semi-centralised-wastewater-treatments-7>
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse (Fourth ed.)*. New York: Metcalf & Eddy, Inc. McGraw-Hil.
- Wilderer, P. A., & Schreff, D. (2000). Decentralized and Centralized Wastewater Management: a Challenge for Technology Developers. *Water Science and Technology*, 41(1), 1-8.