

DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS ORIENTADA A MUNICIPIOS CON POBLACIÓN MENOR A 30.000 HABITANTES*

José Luis González Manosalva** ; Roberto Mejía Ruiz*** ; Francisco Molina Pérez****

Recibido: 31/07/2012

Aceptado: 05/10/2012

RESUMEN

Se presenta el diseño conceptual de una planta experimental de tratamiento de aguas residuales para poblaciones menores de 30.000 habitantes. El diseño integra seis esquemas de tratamiento interconectados, incluyendo sistemas convencionales y no convencionales, con disposición final del efluente a un cuerpo de agua o infiltración lenta en el terreno, cumpliendo con la norma vigente en Colombia. El proceso incluyó una revisión del estado del arte, el diseño de plantas de este tipo como la planta de Carrión de los Céspedes (Andalucía-España), la planta UFMG/COPASA (Minas Gerais-Brasil), los trabajos realizados en Colombia del IDEAM-CINARA-UTP y los ensayos realizados por Madera, Silva y Peña del CINARA en planta piloto. El área estimada para la construcción de los esquemas propuestos es de 18.000 m² y los costos fijos de construcción de la planta se estiman en 850 millones de pesos para tratar un caudal de 1,5 l/s de agua residual doméstica.

Palabras clave: aguas residuales domésticas, tecnología apropiada, plantas de tratamiento de aguas residuales -PTAR-.

* Este artículo se origina en el Trabajo de Grado de José Luis González Manosalva para optar al título de Ingeniero Sanitario en la Universidad de Antioquia.

** Especialista en Gestión Ambiental, Teléfono: (574) 4309623, E-mail: jlgonzal@unal.edu.co, Universidad Nacional de Colombia, calle 59A No 63-20 Bloque 21 of 111.

*** Magister Ingeniería Ambiental, profesor de la Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental, GAIA, Teléfono: (574) 2195570, E-mail: rmejia@udea.edu.co, Ciudad Universitaria, calle 67 No. 53 - 108 Bloque 20 of 438.

**** Doctor Ingeniería Química y Ambiental, profesor de la Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental, GAIA, Teléfono: (574) 2196563, E-mail: fmolina@udea.edu.co, Ciudad Universitaria, calle 67 No. 53 - 108 Bloque 20 of 438.

CONCEPTUAL DESIGN OF AN EXPERIMENTAL HOUSEHOLD WASTE WATER TREATMENT PLANT ADDRESSED TO MUNICIPALITIES WITH A POPULATION LOWER THAN 30,000 INHABITANTS

Abstract

Conceptual design of an experimental waste water treatment plant for populations lower than 30,000 inhabitants is presented. The design integrates six interconnected treatment systems, including conventional and non-conventional systems with final disposal of the effluent to a water body or slow infiltration in the soil, complying with Colombian norms in force. The process included a state-of-the-art revision, design of this kind of plants (such as Carrión de los Céspedes in Andalucía, Spain; UFMG/COPASA plant in Minas Gerais-Brazil), works conducted in Colombia (IDEAM-CINARA-UTP), and tests performed by Madera, Silva, and Peña from CINARA in a pilot plant. Area estimated for construction of systems proposed reaches 18,000 m² and fixed costs for construction of the plant is estimated in 850 million Colombian pesos for treating a 1.5 l/s flow of household waste water.

Key words: household waste water; proper technology; waste water treatment plants.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de desarrollo del milenio según el cual se debe reducir a la mitad el porcentaje de personas sin acceso sostenible al agua potable antes de 2015 es una tarea monumental. Para cumplir los desafíos de este objetivo de desarrollo del milenio los países de la región de América Latina y el Caribe tendrán que superar enormes obstáculos, entre ellos ampliar el acceso a servicios de agua y saneamiento para los pobres, al tiempo que garantizan su accesibilidad, eficiencia y sostenibilidad, y mejorar el marco reglamentario para la inversión.

En Colombia, se experimenta actualmente una disminución progresiva de la oferta hídrica, debida fundamentalmente al vertimiento de aguas residuales y a los procesos de degradación de las cuencas. Lo anterior hace especialmente vulnerables los sistemas de acueducto del 80% de los municipios colombianos que se abastecen de pequeñas fuentes de agua superficiales (arroyos, quebradas, riachuelos) [1].

Con la infraestructura existente en Colombia, se está tratando aproximadamente el 10% de las aguas residuales, a pesar de contar con una capacidad instalada para tratar cerca del 20% [2]. Por lo tanto, es importante promover la investigación y el desarrollo en sistemas de tratamientos de aguas residuales que permitan de manera económica y eficiente aportar conocimientos para el posterior desarrollo y operación de plantas de tratamiento en municipios que no cuentan con este recurso o que no tienen un óptimo manejo de las existentes.

En Antioquia, las Corporaciones Regionales Cornare y Corantioquia vienen realizando importantes inversiones en el área del saneamiento municipal.

En el informe de gestión de Corantioquia para el 2005 se presenta el siguiente balance:

“Hoy tenemos avances significativos en los procesos para la descontaminación de algunas de las más importantes cuencas hidrográficas de la

jurisdicción, ríos Cauca y San Juan, mediante la implementación de 20 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales y la formulación y el diseño de Planes Maestros de Acueducto y Alcantarillado en 76 municipios”. “...Como resultados de esta labor, la institución ejecutó en el periodo señalado programas y proyectos en los cuales ha invertido \$187.734.807.449 millones de pesos, que se ha traducido en el mejoramiento ambiental y social de nuestro territorio y de sus habitantes que adicionalmente han tenido opciones de empleo, capacitación y promoción humana” [3].

Cornare presenta en su informe de gestión 2004-2006:

“En torno al mejoramiento de la calidad del agua en la región, se dio inicio a la ejecución del plan maestro de alcantarillado más importante, por su impacto, en el municipio de Rionegro, con la participación del municipio, la ESP Aguas de Rionegro y de capital privado proveniente de la empresa Coltejer Ltda. De igual forma se avanzó en el incremento de la cobertura en la recolección y tratamiento de las aguas residuales en municipios como Marinilla, La Ceja, El Retiro, Alejandría, Granada, Guarne, el Carmen de Viboral, El Peñol y Abejorral, entre otros. Así mismo se adelantaron los procesos de contratación de los planes maestros de alcantarillado en los corregimientos de la Danta, Estación Cocorná y Las Mercedes. Las inversiones totales realizadas en este periodo con aportes de Cornare, los municipios, las Empresas de Servicios Públicos y otros asciende a \$28.900'000.000” [4].

Las inversiones realizadas tanto en la jurisdicción de Corantioquia como en la de Cornare cubren fundamentalmente la construcción de sistemas de alcantarillado y sistemas primarios de tratamiento de aguas dotados de digestión anaerobia de lodos primarios. Por lo tanto, en un futuro inmediato se requiere de la implementación de sistemas secundarios y aun terciarios (remoción de nutrientes) para proteger adecuadamente los recursos hídricos superficiales de la región.

En Antioquia el 88% de las cabeceras municipales tienen poblaciones menores de 30.000 habitantes, por lo que el modelo de planta experimental abarcaría una cantidad importante de la región. Sin embargo, no debe olvidarse que condiciones medioambientales como la precipitación y la temperatura influyen de manera considerable en el comportamiento y la selección de las tecnologías para la planta experimental.

Para la construcción del modelo conceptual se tomaron como base la experiencias de la comunidad de Andalucía-España donde se cuenta con la planta experimental Carrión de los Céspedes [5, 6] y de la ciudad de Belo Horizonte-Minas Gerais-Brasil donde funciona la planta experimental UFMG/COPASA [7, 8], ambos sistemas concebidos como una herramienta que permite obtener conocimientos concretos acerca de las pautas óptimas de diseño y operación de sistemas de bajo costo, adaptadas a las particularidades climáticas y socioeconómicas locales. Adicionalmente, se utilizó el documento “Esquemas tecnológicos para el tratamiento de aguas residuales domésticas y manejo de lodos considerados en el modelo conceptual” del Proyecto de selección de tecnologías para el control de la

contaminación por aguas residuales domésticas para poblaciones entre 500 y 30.000 habitantes, proyecto adelantado por CINARA [9], del cual se toman las combinaciones para los diferentes procesos involucrados en el diseño del modelo conceptual.

1 METODOLOGÍA

El presente trabajo desarrolla el diseño conceptual de una planta experimental de tratamiento de aguas residuales orientada a cubrir el vacío actual en el diseño y selección de procesos de tratamiento, capacitación de operarios, operación y optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales para municipios menores de 30 000 habitantes. El diseño conceptual se desarrolló mediante la búsqueda de información en fuentes secundarias del estado del arte, las experiencias a escalas mundial, continental y nacional, tomando en cuenta adicionalmente las condiciones ambientales y socioeconómicas de la región antioqueña.

1.1 Características de las aguas residuales

En la tabla 1 se relacionan las principales características estudiadas en nuestro medio, como base para el prediseño de la planta experimental.

Tabla 1. Características de las aguas residuales en nuestro medio.

| Contaminantes | Unidades | Concentración | | |
|-----------------------------------|----------|---------------|-------|------|
| | | Baja | Media | Alta |
| Sólidos totales (ST) | mg/L | 390 | 720 | 1230 |
| Sólidos disueltos totales (SDT) | mg/L | 270 | 500 | 860 |
| Fijos | mg/L | 160 | 300 | 520 |
| Volátiles | mg/L | 110 | 200 | 340 |
| Sólidos suspendidos totales (SST) | mg/L | 120 | 210 | 400 |
| Fijos | mg/L | 25 | 50 | 85 |
| Volátiles | mg/L | 95 | 160 | 315 |
| Sólidos sedimentables | mg/L | 5 | 10 | 20 |
| Demanda bioquímica de oxígeno | mg/L | 110 | 190 | 350 |
| Carbono orgánico total (COT) | mg/L | 80 | 140 | 260 |
| Demanda química de oxígeno (DQO) | mg/L | 250 | 430 | 800 |
| Nitrógeno (Total como N) | mg/L | 20 | 40 | 70 |
| Orgánico | mg/L | 8 | 15 | 25 |
| Amonio libre | mg/L | 12 | 25 | 45 |

| Contaminantes | Unidades | Concentración | | |
|--|------------|---------------|----------|----------|
| | | Baja | Media | Alta |
| Nitritos | mg/L | 0 | 0 | 0 |
| Nitratos | mg/L | 0 | 0 | 0 |
| Fósforo (Total como P) | mg/L | 4 | 7 | 12 |
| Orgánico | mg/L | 1 | 2 | 4 |
| Inorgánico | mg/L | 3 | 5 | 10 |
| Cloruro | mg/L | 30 | 50 | 90 |
| Sulfato | mg/L | 20 | 30 | 50 |
| Aceites y grasas | mg/L | 50 | 90 | 100 |
| Compuestos orgánicos volátiles (VOC's) | mg/L | <100 | 100-400 | >400 |
| Coliformes totales | No./100 mL | 106-108 | 107-109 | 107-1010 |
| Coliformes fecales | No./100 mL | 103-105 | 104-106 | 105-108 |
| Cryptosporidium oocysts | No./100 mL | 10-1-100 | 10-1-101 | 10-1-102 |
| Giardia lamblia cysts | No./100 mL | 10-1-101 | 10-1-102 | 10-1-103 |

Fuente: [10]

1.2 Niveles de tratamiento

El grado de tratamiento requerido se basa en las características del afluente y en la calidad del efluente requerida por la normativa vigente. Si el efluente es descargado en un cuerpo de agua natural, este deberá cumplir con los requerimientos legales vigentes. Si el agua es usada para irrigación, el efluente deberá satisfacer también las regulaciones de salud y límites gubernamentales. La tabla 2 presenta la clasificación de los niveles de tratamiento usados en nuestro medio y el objetivo de los mismos.

Tabla 2. Niveles de tratamiento de aguas residuales.

| Tipo de tratamiento | Objetivo |
|---------------------|--|
| Preliminares | Eliminar material grueso Homogenizar caudal |
| Primarios | Eliminación de sólidos suspendidos. Eliminación de grasas |
| Secundarios | Eliminar sólidos disueltos Eliminar DQO y DBO |
| Terciarios | Remoción nutrientes, N y P Remoción y/o recuperación de metales o compuestos orgánicos Remoción de sales |
| Remoción de lodos | Remoción de humedad Eliminación DQO |

Fuente: [11]

1.3 Selección de los procesos de tratamiento y elaboración del modelo conceptual

Las plantas de tratamiento de aguas residuales utilizan una combinación de procesos de tratamiento para asegurar el grado de depuración deseado. Adicionalmente, el ingeniero diseñador debe evaluar otros factores importantes en la selección de los procesos de tratamiento. Estos factores incluyen componentes tratados, limitaciones en el efluente, proximidad a áreas construidas, requerimientos hidráulicos, disposición de lodos, requerimientos de energía y costos de operación y mantenimiento [12].

En la actualidad se dispone de una amplia gama de tecnologías aplicables al tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas colectividades, que abarca desde tecnologías extensivas (como lagunajes y humedales artificiales) a tecnologías intensivas (caso de la aireación prolongada, los biorreactores de membranas y los reactores secuenciales). La selección de uno u otro tipo de tecnología debe hacerse en función de las condiciones socioeconómicas, territoriales, y climatológicas de cada situación concreta y con base en criterios de sostenibilidad, no descartándose la posible combinación entre las diferentes soluciones tecnológicas.

2 RESULTADOS

Tomando como base el documento “Esquemas tecnológicos para el tratamiento de aguas residuales domésticas y manejo de lodos considerados en el modelo conceptual” [9], en el que se proponen un total de 104 esquemas tecnológicos para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, se procede a escoger una combinación de procesos de tratamiento (6 en total, más estabilización y disposición de lodos) que cubran la mayor relación de tecnologías para constituir la planta experimental, tomando como base para la selección los sistemas con mayor eficiencia, más bajo costo de construcción y mantenimiento así como tecnologías de uso reciente en el país (caso de los biodiscos).

A continuación se presentan en la tabla 3 los esquemas tecnológicos escogidos, y en las tablas 4 y 5, los parámetros de diseño utilizados en el cálculo de áreas.

Tabla 3. Esquemas tecnológicos seleccionados para el tratamiento de aguas residuales en el diseño de la planta experimental

| Número | Esquema | | | |
|--------|------------|----------|----------------|-----------|
| | Preliminar | Primario | Secundario | Terciario |
| S1 | Tpr2 | S1C | BioD + S2 | |
| S11 | Tpr2 | | UASB + FP + S2 | |
| S12 | Tpr2 | S1A | HFL | |
| TN3 | Tpr2 (1) | TS | FA | HFS |
| TP18 | Tpr2 (1) | LA | HFS | LM |
| DT4 | Tpr2 | | LF | IL |

(1) Originalmente este esquema viene con tratamiento preliminar tipo TPr1 y se propone cambiar al sistema TPr2 ya que la gran mayoría de los sistemas de alcantarillado de los municipios antioqueños son de tipo combinado con el agravante de carreteras destapadas que aportan gran cantidad de sólidos a las aguas residuales. Utilizar como método preliminar TPr2 no aporta cambios significativos a los cálculos de áreas utilizados más adelante, así como tampoco afecta los tratamientos posteriores al mismo

Fuente: [9]

Tabla 4. Criterios de diseño para el cálculo de área requerida por las unidades de tratamiento de aguas residuales domésticas

| Parámetro | Sistemas | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|---|----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|------|
| | CR | D | TS | SCI | SAI | S2 | LA | LF | LM | HF | HS | IL | FP | FA | BioD | UASB |
| 1 Caudal de agua residual 0,30 - 100 L/s | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 2 Velocidad de aproximación a la rejilla 0,6 m/s | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 Velocidad horizontal 0,3 m/s | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 Velocidad crítica de sedimentación 0,02 m/s | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 Velocidad crítica de sedimentación 20 m ³ /m ² .d | | | | | X | | | | | | | | | | | |
| 6 Velocidad de flujo entre placas 0,13 cm/s | | | | | X | | | | | | | | | | | |
| 7 Carga hidráulica superficial 24 m ³ /m ² .d | | | | | | X | | | | | | | | | | |
| 8 Carga hidráulica superficial 6,5 m ³ /m ² .d | | | | | | | | | | | | | X | | X | |
| 9 Carga hidráulica 0,5-6 m ³ /año | | | | | | | | | | | | X | | | | |
| 10 Longitud 4-10 m | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 Longitud de placas 2,4 m | | | | | X | | | | | | | | | | | |
| 12 Ancho 0,2-0,6 m | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 Altura de lámina de agua 0,01-0,56 m | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 Altura útil 2 m | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| 15 Altura útil 3 m | | | | X | | | | | | | | | | | | |
| 16 Altura útil 4 m | | | | | | X | | | | | | | | | | X |
| 17 Profundidad 0,38 m | | | | | | | | | | X | X | | | | | |
| 18 Profundidad 1 m | | | | | | | | | X | | | | | | | |
| 19 Profundidad 1,5 m | | | | | | | | | | | | | | X | | |
| 20 Relación largo: ancho 3:1 | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| 21 Diámetro del disco 3 m | | | | | | | | | | | | | | | X | |
| 22 Área del disco 14,1 m ² | | | | | | | | | | | | | | | X | |
| 23 Espesor 0,01 m | | | | | X | | | | | | | | | | X | |
| 24 Separación entre placas 0,12 m | | | | | X | | | | | | | | | | | |

| Parámetro | Sistemas | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----------|---|----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|------|
| | CR | D | TS | SCI | SAI | S2 | LA | LF | LM | HF | HS | IL | FP | FA | BioD | UASB |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | X | |
| 26 | | | | | X | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | X | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | X | | |
| 29 | | | | X | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | X |
| 31 | | | X | | | | | | | | | | | X | | |
| 32 | | | | | | | | | X | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | X | X | | X | X | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | X | X | | | | | |
| 35 | | | | | | | X | | | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | | | X | X | X | | | | | |
| 37 | | | | | | | | | | | | | | | X | |
| 38 | | | | | | | | | | | | | | | X | |
| 39 | | | | | | | | | | X | X | | | | | |

Donde:

| | | | | | |
|------|---|-----|---|------|------------------------------|
| Tpr1 | Tratamiento preliminar de rejilla gruesa + rejilla fina | DP | Esquema tecnológico para tratamiento y disposición en terreno | FA | Filtro anaerobio |
| Tpr2 | Tratamiento preliminar de rejilla gruesa + rejilla fina + desarenador | SIC | Sedimentador primario convencional | FP | Filtro percolador |
| S | Esquema tecnológico para tratamiento secundario | S1A | Sedimentador primario alta tasa | UASB | Reactor USAB |
| TN | Esquema tecnológico para tratamiento terciario con remoción de nutrientes | S2 | Sedimentador secundario | HFL | Humedal flujo libre |
| TP | Esquema tecnológico para tratamiento terciario con remoción de patógenos | TS | Tanque séptico | HFS | Humedal flujo subsuperficial |
| | | LA | Laguna anaerobia | BioD | Biodiscos |
| | | LF | Laguna facultativa | IL | Infiltración lenta |
| | | LM | Laguna de maduración | CR | Canal de rejillas |
| | | | | D | Desarenador |

Fuente: [9]

Tabla 5. Criterios de diseño para el cálculo de área requerida por las unidades de tratamiento de lodos.

| Parámetro | Sistemas | | | | | |
|-----------|---|--------|------|----|----|-----|
| | EG | | | DA | EA | LSc |
| | lp+lbd | lp+lfp | lsc1 | | | |
| 1 | ST en el afluente al espesador 0,04% | X | X | X | | |
| 2 | ST en el efluente del espesador 0,05% | X | X | | | |
| 3 | ST en el efluente del espesador 0,07% | | | X | | |
| 4 | Porcentaje de sólidos volátiles en el lodo 80% | | | X | | |
| 5 | Carga superficial 70 Kg/m ² .día | X | | | | |
| 6 | Carga superficial 80 Kg/m ² .día | | X | | | |
| 7 | Carga superficial 125 Kg/m ² .día | | | X | | |
| 8 | Carga superficial 1,05 Kg SV/m ³ .día | | | X | | |
| 9 | Altura del lodo 0,3 m | | | | | X |
| 10 | Altura almacenamiento 1 m | | | | X | |
| 11 | Altura 7 m | | | X | | |
| 12 | Incremento del volumen de lodo por adición de cal 1,5 | | | | X | |
| 13 | Tiempo de secado 15 días | | | | | X |
| 14 | Factor de seguridad 1,2 | | | | | X |
| 15 | Factor de seguridad 1,5 | X | X | X | X | X |

Donde:

| | | | |
|-----|-------------------------------|--------|--|
| L | Esquema para manejo de lodos | Dan | Digestión anaerobia convencional |
| EG | Espesamiento por gravedad | lp+lbd | Lodo primario + lodo de Biodiscos |
| EA | Estabilización alcalina | lp+lfp | Lodo primario + lodo filtro percolador |
| LSc | Lechos de secado con cubierta | lsc1 | Lodo de sedimentadores primarios |

Fuente: [9]

En cuanto al manejo de lodos la tabla 6 presenta los esquemas seleccionados.

Tabla 6. Esquemas tecnológicos seleccionados para el tratamiento de lodos

| Número | Esquema |
|----------------------------|----------------|
| <i>Lodos crudos</i> | |
| L4 | EG + Dan + LSc |
| L6 | EG + EA + LSc |
| <i>Lodos Estabilizados</i> | |
| L8 | LSc |

Donde:

- L Esquema para manejo de lodos
- EG Espesamiento por gravedad
- EA Estabilización alcalina
- LSc Lechos de secado con cubierta
- Dan Digestión anaerobia convencional

Fuente: [9]

Finalmente, se propone darle uso agrícola al lodo estabilizado como método de disposición final de este material.

En la figura 1, se presenta el diagrama de flujo de la planta experimental con la correspondiente disposición final de las aguas tratadas.

2.1 Aplicabilidad geográfica

El diseño de la planta piloto se concibe con el objetivo de encontrar experiencias concretas aplicables a la región antioqueña y comprobar la validez de los criterios de diseño disponibles en la bibliografía existente sobre las tecnologías no convencionales.

En primer lugar, se realizó una evaluación del estado del arte y de las condiciones de aplicación de los diferentes procesos de depuración convencional y no convencional, apoyados en una revisión de la información publicada sobre instalaciones de este tipo y en un conjunto de visitas llevadas a cabo a plantas convencionales en la región como la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Guarne, la planta San Fernando ubicada en el municipio de Medellín y la planta de tratamiento



Figura 1. Esquema de flujo propuesto para la planta experimental

Fuente: Software Google Earth y elaboración propia

de aguas residuales de la Empresa Imusa, ubicada en Rionegro, Antioquia.

En función de la información disponible para cada cabecera municipal y relativa a climatología, se desarrolló una tipificación de zonas homogéneas en las que fuese factible aplicar tecnologías similares, estableciendo una selección de alternativas para cada caso.

Como factor principal de las condiciones climáticas, se seleccionó la temperatura. Por ello, se evalúan las temperaturas promedio de cada uno de las cabeceras municipales en el departamento de Antioquia (ver tabla 7), con poblaciones menores a 30 000 habitantes en el área urbana y se logra la siguiente tipificación: 49 municipios con temperaturas entre 17°C y 21 °C lo que suma un total de 276 637 habitantes equivalentes al 39% de la población de toda Antioquia sin sumar los municipios de La Estrella y Medellín.

Tabla 7. Número de habitantes y temperatura de las cabeceras municipales antioqueñas con poblaciones menores a 30 000 habitantes

| <i>Municipio</i> | <i>Población Cabecera Municipal [Hab]</i> | <i>Temperatura promedio Cabecera Municipal [°C]</i> |
|-----------------------|---|---|
| Anorí | 5,280 | 21 |
| San Roque | 5,901 | 21 |
| Santo Domingo | 2,199 | 19 |
| Yolombó | 6,091 | 21 |
| Angostura | 2,096 | 21 |
| Campamento | 2,450 | 20 |
| Carolina del Príncipe | 3,027 | 19 |
| Gómez Plata | 5,072 | 20 |
| Guadalupe | 1,889 | 20 |
| I tuango | 6,016 | 21 |
| Toledo | 1,345 | 19 |
| Valdivia | 4,848 | 21 |
| Abriaquí | 858 | 18 |
| Armenia | 1,762 | 19 |
| Buriticá | 1,495 | 21 |
| Caicedo | 1,450 | 19 |

| <i>Municipio</i> | <i>Población Cabecera Municipal [Hab]</i> | <i>Temperatura promedio Cabecera Municipal [°C]</i> |
|----------------------|---|---|
| Cañasgordas | 5,432 | 21 |
| Frontino | 7,615 | 21 |
| Giraldo | 1,201 | 17 |
| Heliconia | 2,809 | 21 |
| Abejorral | 6,271 | 17 |
| Alejandro | 1,896 | 20 |
| Argelia | 2,841 | 20 |
| Concepción | 1,476 | 19 |
| El Carmen de Viboral | 22,731 | 17 |
| El Peñol | 8,243 | 18 |
| El Santuario | 19,830 | 17 |
| Granada | 4,060 | 18 |
| Guarne | 13,891 | 17 |
| Guatapé | 4,244 | 19 |
| Nariño | 2,525 | 20 |
| San Vicente | 6,823 | 17 |
| Amagá | 14,070 | 21 |
| Angelópolis | 4,150 | 18 |
| Betulia | 5,159 | 20 |
| Caramanta | 2,586 | 17 |
| Concordia | 8,150 | 19 |
| Fredonia | 8,608 | 20 |
| Hispania | 3,031 | 21 |
| Jardín | 6,965 | 19 |
| Jericó | 7,783 | 18 |
| Pueblorrico | 4,126 | 19 |
| Santa Bárbara | 10,645 | 19 |
| Támesis | 6,488 | 21 |
| Titiribí | 6,759 | 21 |
| Urrao | 15,125 | 20 |
| Valparaiso | 3,169 | 21 |
| Venecia | 6,156 | 21 |
| Total población | 276.637 | |

Fuente: [15]

Como se desea instalar en un único espacio todas las tecnologías convencionales y no convencionales a escala reducida, permitiendo la investigación con mayor grado de economía, y flexibilidad a la par de facilitar la interconexión de los distintos

sistemas instalados, se escoge, por facilidad de acceso y consecución de insumos, control de las instalaciones, requerimientos de área y condiciones climatológicas, el municipio de Guarne que cuenta con una población en la cabecera municipal de 13 891 habitantes. La temperatura media de la cabecera es de 17 °C que está dentro del rango de la tipificación y permite extrapolar datos para los demás municipios de la tabla anterior.

Criterios para el cálculo de área de los esquemas tecnológicos.

El predimensionamiento de las diferentes estructuras se basa en el documento modelo conceptual de selección de tecnología para el control de la contaminación por aguas residuales domésticas [13].

Para definir el área total requerida por el esquema tecnológico, se realizó la sumatoria de las áreas de cada una de las unidades de tratamiento que lo componen, ya sea preliminar, primario, secundario o terciario y manejo de lodos.

A continuación se presentan en las tablas 8 y 9 los cálculos para los requerimientos de área por cada uno de los esquemas de tratamiento y manejo de lodos escogido.

Tabla 8. Estimación del área requerida por sistema de tratamiento para la planta experimental.

| Esquema | Modelo* | Área subtotal (Ha) |
|----------------------|--------------------|----------------------------------|
| S1 | $A=0,0121*Q1,0785$ | 0,019 |
| S11 | $A=0,0138*Q0,9783$ | 0,021 |
| S12 | $A=0,0968*Q0,9931$ | 0,145 |
| TN3 | $A=0,0761*Q0,9909$ | 0,114 |
| TP18 | $A=0,1442*Q0,9941$ | 0,216 |
| DT4 | $A=0,7628*Q0,9997$ | 1,144 |
| Total área requerida | | 1,6576 Ha o 16576 m ² |

* El cálculo del área requerida se realiza para un caudal de 1,5 L/s considerado como caudal promedio a tratar en la planta experimental.

Fuente: [13]

Tabla 9. Estimación del área requerida por el esquema de tratamiento de lodo por nivel de tratamiento.

| Esquema | Modelo* | Área subtotal (Ha) |
|---|-----------------------|---------------------------------|
| S1 (L4 + L6) | $A=0,003*Q + 0,002*Q$ | 0,0075 |
| S11 (L8) | $A=0,006*Q$ | 0,009 |
| S12 (L4 + L6) | $A=0,001*Q + 0,001*Q$ | 0,003 |
| TN3 (L8) | $A=0,022*Q$ | 0,033 |
| TP18 (L8) | $A=0,022*Q$ | 0,033 |
| DT4 (L8) | $A=0,022*Q$ | 0,033 |
| Total área requerida para tratamiento de lodo | | 0,1185 Ha o 1185 m ² |

* El cálculo del área requerida se realiza para un caudal de 1,5 L/s considerado como caudal promedio a tratar en la planta experimental.

Fuente: [13]

Sumando los resultados de las tablas 8 y 9 se obtiene que el área total requerida para la construcción de la planta es 17 761 m².

2.2 Evaluación preliminar de costos

En este apartado se busca llegar a una aproximación de los costos de construcción de la planta propuesta mediante la consulta de diversos documentos de los que se puedan extraer y estimar valores cercanos a la realidad. Ninguno de los valores presentados a continuación incluye el valor de compra de los terrenos y adecuación de protecciones contra inundaciones (jarillones).

Tabla 10. Estimación de costos por esquema de tratamiento.

| Esquema | Costo (U\$/hab) 2002 | Costo (\$/hab) 2002* | Costo (\$/hab) 2010** |
|---------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| S1 | 42 | \$105.124,74 | \$160.671,85 |
| S11 | 72 | \$180.213,84 | \$275.437,45 |
| S12 | 32 | \$80.095,04 | \$122.416,65 |
| TN3 | 43 | \$107.627,71 | \$164.497,37 |
| TP18 | 32 | \$ 80.095,04 | \$122.416,65 |
| DT4 | 14 | \$35.041,58 | \$53.557,28 |
| L4 | 34 | \$85.100,98 | \$130.067,69 |

| Esquema | Costo (U\$/hab) 2002 | Costo (\$/hab) 2002* | Costo (\$/hab) 2010** |
|--------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| L6 | 6 | \$15.017,82 | \$22.953,12 |
| L8 | 2 | \$5.005,94 | \$7.651,04 |
| Costo de la planta | 277 | \$693.322,69 | \$1.059.669,10 |

* \$2.502,97 Promedio del año 2002. Tomado de <http://dolar.wilkinsonpc.com.co/dolar-historico.html>

** Traído a valor presente con i tomado de http://www.banrep.gov.co/series-estadisticas/see_precios.htm

Fuente: [14]

Los costos directos de inversión para construir la planta experimental con caudal de 1,5 L/s (que corresponde aproximadamente a 800 habitantes) son \$850 millones de pesos, de acuerdo con la referencia utilizada [14], actualizando el valor de 2002 a 2010.

En la figura 2, se presenta una propuesta de esquema de distribución en planta de la configuración experimental, ubicada en el municipio antioqueño de Guarne.

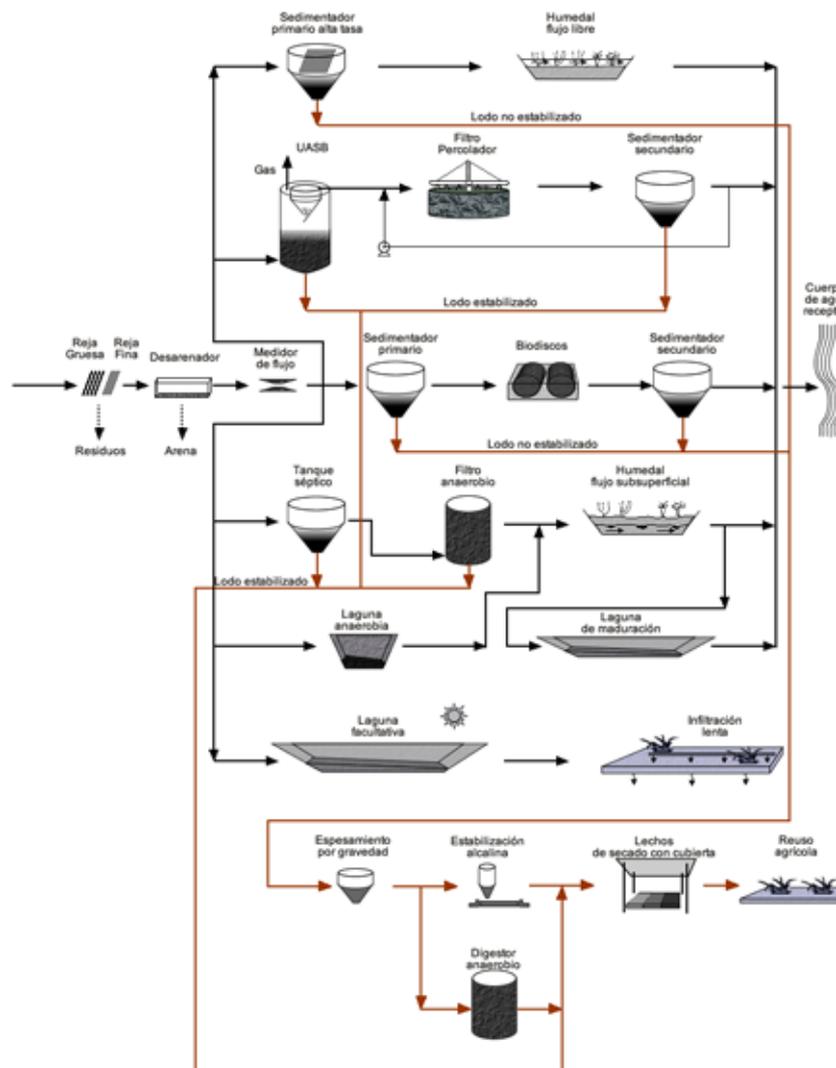


Figura 2. Distribución en planta de los diferentes esquemas de tratamiento para la planta experimental. Ubicación PTAR municipio de Guarne-Antioquia

Fuente: elaboración propia

3 CONCLUSIONES

La implementación de centros para el desarrollo y promoción de tecnologías y provisión de asistencia técnica produce un impacto positivo en el desarrollo de recursos humanos capacitados, adecuación de tecnología al medio local y promoción de nuevas tecnologías. El éxito de esta estrategia ha sido ilustrado por las plantas experimentales de Carrión de los Céspedes (PECC) en Andalucía-España y UFMG/COPASA en Belo Horizonte-Brasil, así como por las experiencias del Instituto CINARA en Colombia y el CEPIS en Perú.

La provisión de asistencia técnica para el manejo adecuado de los servicios de agua y saneamiento, particularmente cuando existen procesos de depuración de aguas residuales, resulta esencial. La experiencia en América Latina demuestra que, independientemente del grado de complejidad del sistema, es necesario un proceso de seguimiento y asistencia técnica periódico.

Lo anterior sustenta la iniciativa de construir la Planta Experimental propuesta en este trabajo, ubicándola en el municipio antioqueño de Guarne, con una extensión de 18 000 m² y un total de 6 tecnologías no convencionales de tratamiento de aguas residuales, así como de otras tantas tecnologías convencionales de carácter experimental. La propuesta plantea, además, proveer la capacitación de operarios, estudios de operación y optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales para municipios menores de 30 000 habitantes y su correspondiente transferencia tecnológica.

Una etapa obligatoria y posterior al presente trabajo está asociada con la búsqueda de financiación que logre dar cumplimiento al diseño y construcción de la planta experimental y su puesta en funcionamiento.

4 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Estrategia de Sostenibilidad 2011/2012 de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Antioquia.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, "Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico," [En línea], acceso 30 de febrero, 2011; Disponible: http://www.minambiente.gov.co/documentos/5774_240610_libro_pol_na_rec_hidrico.pdf, 2010.
- [2] Departamento Nacional de Planeación, "Documento CONPES 3383 Plan de Desarrollo del Sector de Acueducto y Alcantarillado," [En línea], acceso 30 de febrero, 2011; Disponible: <http://www.cortolima.gov.co/SIGAM/CONPES/Conpes3383.pdf>, 2005.
- [3] Corantioquia, "Informe de gestión Corantioquia año 2005," [En línea], acceso 30 de junio, 2009; Disponible: http://www.corantioquia.gov.co/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=77, 2006.
- [4] Cornare, "Informe de gestión 2004-2006," [En línea], acceso 4 de julio, 2009; Disponible: <http://www.cornare.gov.co/archivos/FORMATO%20UNICO%20ACTA%20DE%20INFORME%20DE%20GESTION.doc>, 2007.
- [5] CENTA, "Centro de las nuevas tecnologías del agua: Presentación Planta Experimental Carrión de los Céspedes," [En línea], acceso 8 de mayo, 2009; Disponible: <http://www.plantacarrion-pecc.com/index.php?opcion=1>, 2007.
- [6] F.Khalid, I.Martin, y J.J. SALAS, "The Carrión de los Céspedes Experimental Plant and the Technological Transfer Centre: urban wastewater treatment experimental platforms for the small rural communities in the Mediterranean area". *Desalination*, vol. 215, pp.12-21, 2007.
- [7] P.G.S. De Almeida et al., "Development of compact UASB/trickling filter systems for treating domestic wastewater in small communities in Brazil". *Water Science and Technology*, vol. 59, no 7, pp. 1431-1439, 2009.
- [8] V.P.Sousa, y C.A.L. Chernicharo, "Innovative conception and performance evaluation of a compact on-site treatment system". *Water Science and Technology*, vol. 54, no. 2, pp. 87-94, 2006.
- [9] Convenio IDEAM - UTP- CINARA, "Proyecto de selección de tecnologías para el control de la contaminación por aguas residuales domésticas para poblaciones entre 500 y 30.000 habitantes," [En línea], acceso 27 de mayo, 2009; Disponible: <http://www.ideam.gov.co/publica/aguasresiduales/modelo.pdf>, 2006.
- [10] J.C. Saldarriaga, "Tratamientos convencionales de aguas residuales en la remoción de nutrientes ," [En

- línea], acceso 29 de mayo, 2009; Disponible: http://www.andi.com.co/seccionales/medellin/comite_ambiental/PresentacionANDI2009.pptx, 2009.
- [11] A.P. Restrepo, "Evolución de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales," [En línea], acceso 29 de mayo, 2009; Disponible: http://www.andi.com.co/seccionales/medellin/comite_ambiental/presentacionandi.pdf, 2009.
- [12] S.R. Qasim, *Wastewater Treatment Plants: Planning, Design and Operation*, 2a ed., Lancaster: Technomic. Pub. Co. 1999, 1107 p.
- [13] Convenio IDEAM - UTP- CINARA, "Proyecto de selección de tecnologías para el control de la contaminación por aguas residuales domésticas para poblaciones entre 500 y 30.000 habitantes. Bloque 4. Aspectos tecnológicos," [En línea], acceso 27 de febrero, 2010; Disponible: <http://www.ideam.gov.co:8080/publica/aguasresiduales/Bloque4.pdf>, 2006.
- [14] D.S. Quintero et al. "Modelo de costos para el tratamiento de las aguas residuales en la Región," *Scientia et Technica*, [En línea], vol. XIII, no. 37, pp. 591-596, Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/849/84937102.pdf>, 2007.
- [15] Gobernación de Antioquia. "Anuario estadístico de Antioquia 2009," [En línea], acceso 30 de junio, 2011; Disponible: <http://www.antioquia.gov.co/antioquia-v1/organismos/planeacion/estadisticas/anuario2009.html>, 2010.

