

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DOS TRATAMIENTOS NATURALES DE
AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES PARA
USO EN RIEGO AGRÍCOLA EN LA FINCA EL JARDÍN-TOCAIMA-
CUNDINAMARCA**

**ALEJANDRA ORTIZ COCUY
BRAYAN DANIEL RIASCOS ARTEAGA**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
GIRARDOT
2016**

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DOS TRATAMIENTOS NATURALES DE
AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES PARA
USO EN RIEGO AGRÍCOLA EN LA FINCA EL JARDÍN-TOCAIMA-
CUNDINAMARCA**

**ALEJANDRA ORTIZ COCUY
BRAYAN DANIEL RIASCOS ARTEAGA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

**Director
DANNY DANIEL CUBILLOS PEDRAZA
Microbiólogo Agrícola y Veterinario
MSc. Desarrollo Rural**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
GIRARDOT
2016**

Nota de aceptación

Firma del director del proyecto

Firma del jurado

Dedicatoria

A mi padre Félix por hacer todo lo posible para que culminara esta etapa con amor y sus buenos consejos y por ser la base de nuestra familia, a mi madre Constanza por su cariño y apoyo, a mis hermanas y en especial a Jenny por su valiosa colaboración, a mi sobrina Valeria Uribe, a mis tíos Alcira y Farid por ser incondicionales en todo momento y a Dios por guiarme y acompañarme todos mis días.

Alejandra

A mis padres, Efrén y Luz Mery por brindarme su luz y su amor todos los días de mi vida, y ser el apoyo incondicional en toda mi etapa universitaria; a Santi mi sobrino querido le dedico este trabajo como símbolo del esfuerzo y dedicación que como ejemplo quiero darle para su vida; a mi adorada abuela María Anais quien edificó y cuidó amorosamente a toda una familia, ahora nos acompañarás desde el alba hasta el atardecer por siempre.

A la música, a ella, la que le ha dado sentido absoluto a mi vida.

Brayan

Agradecimientos

Expresamos un sentido agradecimiento a nuestro director de trabajo de grado Danny Cubillos por su sincero acompañamiento y disposición durante la realización del mismo, y por brindarnos su valiosa amistad.

Al profesor Miguel Ávila por brindarnos su apoyo durante la elaboración del trabajo de grado.

Al laboratorio de física y química de la Universidad de Cundinamarca- Seccional Girardot por facilitarnos el espacio de práctica para la preparación de los implementos de muestreo.

Al laboratorio de CORPOICA sede Tibaitatá- Mosquera por apoyar esta investigación.

A nuestros amigos Lizeth, María del Mar, Ana María, Julio “coste”, Laura y Leidy por compartir esta importante etapa en nuestras vidas, y por conformar un especial grupo de amigos con quienes compartimos muchas sonrisas y buenos momentos. Esperamos lleven sus vidas por el camino del amor y la felicidad siempre.

CONTENIDO

1. RESUMEN.....	12
2. INTRODUCCIÓN.....	13
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
4. JUSTIFICACIÓN	16
5. OBJETIVOS	17
Objetivo General.....	17
Objetivos específicos	17
6. MARCO REFERENCIAL.....	18
6.1 MARCO TEÓRICO.....	18
6.1.1 Antecedentes del uso de agua residual para riego en el mundo.....	18
6.1.2 Organismos encontrados en las aguas residuales	23
6.1.3 Tratamientos naturales de agua residual	25
6.1.4 Parámetros de la calidad de agua residual según la OMS.....	38
6.1.5 Parámetros establecidos para la investigación	42
6.2 MARCO LEGAL	44
7. DISEÑO METODOLÓGICO	45
7.1 Ubicación y Características agro climatológicas:	45
7.2 METODOLOGÍA.....	51
7.2.1 Montaje del Filtro lento en arena (FLA)	51
7.2.2 Acondicionamiento de la laguna de maduración.....	54
7.2.3 Bombeo a los tratamientos.	54
7.2.4 Muestreo	56
7.2.5 Procesamiento de los resultados	59
8. RESULTADOS.....	60
8.1 Desarrollo de las unidades de tratamiento.	60
8.1.1 Aforo del sistema de evacuación de aguas residuales.	60
8.1.2 Establecimiento del pozo de almacenamiento de agua gris.	63
8.1.3 Establecimiento de los sistemas de tratamiento.	65

8.1.4 Bombeo y operación de las unidades de tratamiento.	69
8.2 Resultados de los análisis de laboratorio.	73
8.2.1 Resultados de la muestra inicial de agua residual cruda.....	73
8.2.2 Resultados del agua tratada por Laguna de maduración	76
8.2.3 Resultados del agua tratada por filtro lento en arena.....	82
8.3 Condiciones para reúso agrícola	88
8.3.1 Factores determinantes en las eficiencias de remoción.	91
9. CONCLUSIONES.....	100
10. RECOMENDACIONES.....	102
BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXOS.....	112

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Demanda hídrica de las actividades productivas de Colombia.....	21
Tabla 2	Parámetros físico-químicos y microbiológicos para tres tipos de reúso agrícola.....	38
Tabla 3	Calidad parasitológica y microbiológica de aguas residuales para uso en agricultura según la categoría del cultivo.....	39
Tabla 4	Criterios de la calidad admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola.....	40
Tabla 5	Parámetros físico-químicos y microbiológicos para el uso de agua residual tratada en riego.....	41
Tabla 6	Especificaciones del lecho filtrante	53
Tabla 7	Especificaciones de muestreo.....	57
Tabla 8	Caudales de las tuberías de agua residual asociada a actividades cotidianas en la Finca.....	60
Tabla 9	Generación de agua residual estimada en una semana.....	62
Tabla 10	Caudales de la tubería de agua gris dirigida hacia el pozo de almacenamiento.....	64
Tabla 11	Mediciones de velocidad de filtración.....	70
Tabla 12	Caudales del filtro lento en arena tomados del ducto de salida.....	71
Tabla 13	Resultados del análisis de laboratorio de muestra inicial	73
Tabla 14	Porcentajes de remoción de la laguna de maduración.....	76
Tabla 15	Porcentajes de remoción del filtro lento en arena	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Aplicación de agua residual en agricultura.....	19
Figura 2 Demanda hidria por sectores en Colombia.....	22
Figura 3 Mecanismos de transporte en el filtro lento en arena.....	32
Figura 4 Configuración general de un Filtro lento en arena.....	33
Figura 5 Mecanismos de remoción en lagunas aerobias.....	35
Figura 6 Esquema de una serie de lagunas de estabilización.....	37
Figura 7 Ubicación geográfica del municipio de Tocaima en el Departamento de Cundinamarca.....	45
Figura 8 Ubicación geográfica de la vereda la salada en el municipio de Tocaima.....	46
Figura 9 Finca el Jardín ubicada en el km 21 vía Girardot-Tocaima	47
Figura 10 Esquema de la finca	50
Figura 11 Medidas del tanque para el FLA	52
Figura 12 Montaje de falso fondo de FLA	52
Figura 13 Medidas de laguna de maduración	54
Figura 14 Motobomba de pozo gris.....	55
Figura 15 Medidor de flujo	56
Figura 16 Frascos de muestreo	57
Figura 17 Calibración de pH metro.....	58
Figura 18 Vertimiento puntual de aguas grises en la finca.....	62
Figura 19 Pozo de almacenamiento de agua gris.....	64
Figura 20 Montaje del lecho filtrante.....	65
Figura 21 Esquema del filtro lento en arena.....	66
Figura 22 Terraplén divisorio de la laguna de maduración.....	68
Figura 23 Impermeabilización de la laguna.....	69
Figura 24 Llenado de laguna de maduración	69
Figura 25 Llenado del filtro lento en arena	70
Figura 26 Esquema general del establecimiento de las unidades de tratamiento.....	72
Figura 27 Crecimiento algal en la laguna.....	78
Figura 28 Comportamiento de dos tipos de flujos en la laguna.....	80
Figura 29 Agua tratada por el filtro lento en arena (izq.) y agua tratada por la laguna de maduración (der).....	84
Grafica 1 Porcentajes de remoción de los tratamientos implementados.....	87

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1	Cultivos regados con agua residual sin tratar.....	20
Cuadro 2	Microorganismos presentes en aguas residuales y enfermedades asociadas	24
Cuadro 3	Parámetros de calidad de agua para la investigación.....	42
Cuadro 4	Análisis de remoción de los parámetros analizados	91
Cuadro 5	Matriz comparativa entre las unidades de tratamiento.....	97

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1	Tabla de enfermedades causadas por microorganismos en el agua residual	112
Anexo 2	Proceso de muestreo	115
Anexo 3	Resultados del análisis de laboratorio de la muestra inicial.....	119
Anexo 4	Resultados de análisis de laboratorio de muestra de agua tratada en laguna de maduración.....	120
Anexo 5	Resultado de análisis de laboratorio de agua tratada en filtro lento en arena.....	121
Anexo 6	Costos de implementación de los tratamientos implementados.....	122
Anexo 7	Análisis de suelos de la Finca el Jardín.....	123
Anexo 8	Cálculos de las formulas implementadas	124

1. RESUMEN

En este trabajo de investigación se implementaron las unidades de tratamiento natural correspondientes a una laguna de maduración y un filtro lento en arena en los meses de Febrero y Marzo de 2016 en la finca El Jardín del municipio de Tocaima-Cundinamarca donde se determinó la eficiencia en la inactivación de coliformes totales y fecales, valorando su potencial reúso en riego agrícola. Para establecer las unidades de tratamiento se realizaron modificaciones a las tuberías de evacuación de aguas residuales, se construyó un pozo de almacenamiento de agua gris y se adquirieron materiales para el montaje de los tratamientos. Paralelo a la puesta en marcha de las unidades de tratamiento aplicando proporciones equitativas de agua negra y agua gris, se tomó muestra del agua residual sin tratar mediante análisis de laboratorio para caracterizar el contenido de DBO₅, DQO, Sólidos totales, Sólidos suspendidos, Sólidos disueltos, Fosforo total, Nitrógeno orgánico, Coliformes totales y Coliformes fecales.

Al culminar los ciclos establecidos para cada unidad de tratamiento se realizaron los respectivos análisis de laboratorio y se determinaron las eficiencias de remoción de los parámetros mencionados. Se obtuvieron porcentajes de remoción de los parámetros medidos entre el 20,8% y 55,7% para laguna de maduración con capacidad de tratamiento de 2 metros cúbicos y un tiempo de retención de 18 días; y entre 47,4% y 100% de remoción para el filtro lento en arena con una carga hidráulica de 260 L/día y una velocidad de filtración de 0,03 m/h. La mejor remoción de coliformes totales y fecales ocurrió en el filtro lento en arena con 99,6% y 100% respectivamente, concluyendo que el filtro lento en arena presentó mejores remociones para todos los parámetros analizados en esta investigación, siendo así el tratamiento natural más eficiente en la depuración del agua residual de la finca El Jardín, además el agua tratada por éste, cumplió con los requerimientos microbiológicos de contenido de coliformes fecales establecidos en las directrices internacionales y normas nacionales, por tanto el agua se catalogó como apta para reúso en riego agrícola.

2. INTRODUCCIÓN

En el marco del uso eficiente y conservación del recurso hídrico se encuentra el reúso de aguas residuales, las cuales han sido utilizadas para diversos fines como el riego de cultivos, jardines, y abastecimiento de agua subterránea¹. Por tanto el reúso del agua residual se ha proyectado como una estrategia que permite afrontar la problemática de escasez y racionamiento de agua en regiones con limitada disponibilidad de ésta.

Según lo anterior, el área regada a nivel mundial con agua residual es de aproximadamente 1´745.000 hectáreas, siendo China el país con mayor actividad de reúso. En Latinoamérica el país que más ha reutilizado agua residual es México.² La Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Mundial para Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) han sido las instituciones que han establecido parámetros microbiológicos para el reúso inocuo de agua residual en riego³.

Los tratamientos naturales han sido los métodos más usuales para la depuración de agua residual doméstica, donde la eliminación de los contaminantes presentes en las aguas residuales se realiza por componentes biológicos del medio natural. Se diferencian dos grandes métodos de tratamiento natural: aplicación directa en el terreno y sistemas acuáticos, en los cuales no se emplean aditivos químicos⁴.

En la finca el Jardín, ubicada en la vereda La Salada del municipio de Tocaima (Cundinamarca) se evidenció una limitada oferta hídrica. Esta finca cuenta con un cultivo de mango (*Mangifera indica*) y sábila (*Aloe vera*) que son regados con agua subterránea captada de un aljibe, sin embargo el agua disponible es intermitente, por lo que no se han podido implementar nuevos cultivos para el desarrollo económico de la finca.

De esta manera, en este trabajo se implementaron dos tratamientos naturales de agua residual doméstica correspondientes a una laguna de maduración y un filtro lento en arena para depurar el agua residual de la finca, en donde se establecieron sus potencialidades de reúso agrícola según su calidad microbiológica.

Con base en lo anterior se comparó la eficiencia de los dos tratamientos mencionados en la remoción de coliformes totales y fecales a través de análisis de laboratorio y se determinó su aptitud de reúso agrícola para la implementación de futuros cultivos en la finca.

¹ MANGA et al. Reusó de aguas residuales un recurso disponible. Universidad del Norte Barranquilla 2001. Guía de investigadores tecnología del Agua, p.17 [En línea]

<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/articulo/view/2271/1483> [Citado el 5 de Octubre de 2015]

² Ibid p. 13

³ WHO. Health Guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture, 1989. Technical Report Series 778 Geneva, p.16-20 [En línea] http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/39401/1/WHO_TRS_778.pdf [Citado el 5 de Octubre de 2015]

⁴ INSTITUTO GEOGRÁFICO Y MINERO DE ESPAÑA. Nuevas tecnologías para el saneamiento, depuración y reutilización de las aguas residuales en la provincia de Alicante, 1995. Capítulo III Métodos naturales de tratamiento, p. 28 [En línea] <http://doc.igme.es/BUSCADORHIDRO/DOCUMENTOS/LIBROS/TECNICAS%20HIDROGEOLOGICAS/LIBRO033/LIBRO033.PDF> [Citado el 5 de Octubre de 2015]

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La agricultura es la actividad que demanda la mayor cantidad de agua dulce extraída en el planeta, y utiliza globalmente el 70%⁵ de dicho recurso con un volumen de 2500 kilómetros cúbicos⁶. Se estima que el porcentaje a nivel mundial de agua para uso agrícola aumente un 20 % para el año 2035⁷, lo que significa una evidente presión a los recursos hídricos para satisfacer la demanda alimentaria en el mundo.

Por lo tanto, el uso de aguas residuales para riego en la agricultura ha sido una alternativa que ha permitido satisfacer la demanda del recurso hídrico en esta actividad, cubriendo los requerimientos de agua en los sistemas agrícolas evitando la contaminación de afluentes superficiales por descarga de aguas servidas.

Además, gracias a su contenido de materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio y oligoelementos, el reúso del agua residual genera beneficios económicos debido a la disminución o eliminación del uso de fertilizantes⁸.

No obstante, la superficie regada con aguas residuales en Colombia corresponde a un área de 1'230.193 hectáreas, en donde solo el 27% del agua utilizada es tratada⁹, evidenciando la problemática de contaminación ambiental por el uso de éstas. Por tanto se observa que la alternativa del reúso del agua residual para riego está limitada por los problemas asociados a la contaminación microbiológica del cultivo y en general por un precario desarrollo de sistemas de tratamiento de agua residual en zonas agrícolas.

De esta manera se seleccionó la finca El Jardín como lugar para el desarrollo de la investigación. La finca pertenece al sector rural del municipio de Tocaima en donde reside el 42% de la población total¹⁰, cuyas aguas residuales son vertidas a pozos sépticos artesanales sin revestimiento y a espacios abiertos dentro de los predios, dando paso a la contaminación por infiltración a las fuentes hídricas subterráneas y vertimientos directos al suelo.

⁵UNESCO. Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, Agua y Energía Resumen Ejecutivo, 2014, p. [En línea] <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002269/226962s.pdf> [Citado el 5 de Octubre de 2015]

⁶ FAO. Agua y Cultivos logrando el uso óptimo del agua en la agricultura, 2002, p. 5 [En línea] ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/cropsdrops_s.pdf [Citado el 5 de Octubre de 2015]

⁷ UNESCO. Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo, Agua para un mundo sostenible, Datos y Cifras, 2015, p. 7 [En línea] http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts_Figures_SPA_web.pdf [Citado el 5 de Octubre de 2015]

⁸ SILVA et al. Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. Artículo Científico. *Agronomía Colombiana* 2008 Vol. 26 No.2 374-379 p. 348

⁹ CEPIS. Inventario de la Situación Actual de las Aguas Residuales Domésticas en Colombia, Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Residuales en América Latina: Realidad y Potencial 2003, p. 31 [En línea] http://www.bvsde.paho.org/bvsaaar/e/proyecto/inventario/col_in.pdf [Citado el 5 de Octubre de 2015]

¹⁰ PLAN DESARROLLO TOCAIMA- CUNDINAMARCA "Inclusión para la prosperidad de Todos 2012-2015", Acuerdo No. 005 Mayo 24 DE 2012, p. 10 [En línea] http://www.tocaima-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/63393364313232396364633962663637/Plan_de_Desarrollo_Tocaima_2012_2015.pdf [Citado el 5 de Octubre de 2015]

Debido a la poca disponibilidad de agua no se han implementado cultivos adicionales en la finca. Teniendo en cuenta el problema de contaminación y la poca oferta de agua para riego se plantea la siguiente pregunta: ¿Es posible tratar adecuadamente el agua residual doméstica de la finca El Jardín hasta alcanzar condiciones aptas para un potencial reúso como agua de riego agrícola?

4. JUSTIFICACIÓN

En los sistemas agrícolas domésticos a pequeña escala se obtiene el agua de diferentes fuentes, las más comunes son el agua proveniente del acueducto local, el agua de aljibes, la de fuentes hídricas superficiales o el agua de lluvia. No obstante, debido a los patrones climáticos, el agua suele encontrarse con menor disponibilidad en algunos meses del año, afectando directamente la actividad agrícola.

Como evidencia de esto La finca el Jardín se ha limitado en la implementación de nuevos cultivos debido a la escasa disponibilidad de agua, condicionado principalmente por la intermitencia de la oferta de agua de aljibe. Por tanto es necesario aprovechar el agua residual generada en la finca aplicándole un tratamiento que permita su reúso seguro.

Además, cuando las aguas residuales sin tratamiento se utilizan para el riego de cultivos que se consumen frescos y sin quitar la cascara (hortalizas y frutos de tallo corto), se aumenta el riesgo de contaminación por patógenos en el agricultor o en el consumidor.

Esta contaminación está dada por la presencia de bacterias fecales en el agua, proporcionando efectos adversos a la salud puesto que son las causantes de enfermedades como el síndrome diarreico, cólera, fiebre tifoidea, disenterías, poliomielitis, hepatitis y salmonelosis, entre otras^{11,12}.

De esta manera, este trabajo se justificó en la necesidad de implementar sistemas de tratamiento de agua residual doméstica en la finca El Jardín que permitieran aprovechar con seguridad sus aguas residuales, manteniendo su contenido de nutrientes e inactivando la carga patógena contenida en ésta; y redujera paralelamente la contaminación a fuentes subterráneas y al suelo, generando además la oportunidad de diversificar a futuro la producción agrícola para obtener impactos positivos en la economía del hogar.

¹¹ UNICEF. Enfermedades comunes relacionadas con el agua y el saneamiento [En línea]
http://www.unicef.org/spanish/wash/index_wes_related.html [Citado el 5 de Octubre de 2015]

¹² SECRETARIA DISTRITAL DE SALUD DE BOGOTÁ. Dirección de Salud Pública Área Vigilancia en Salud Pública 2011 [En línea]
<http://www.saludcapital.gov.co/sitios/VigilanciaSaludPublica/Todo%20Emergencias/Guia%20Atenci%C3%B3n%20de%20Brotos%20ETA1%20Vr%204.pdf> [Citado el 5 de Octubre de 2015]

5. OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la eficiencia en los tratamientos naturales de laguna de maduración y filtro lento en arena para la inactivación de coliformes totales y coliformes fecales del agua residual doméstica de la Finca El Jardín.

Objetivos específicos

- Implementar los sistemas de tratamiento naturales para la depuración del agua residual doméstica en la finca El Jardín.
- Establecer la eficiencia de los tratamientos naturales implementados mediante el análisis de laboratorio de siete parámetros físico-químicos y dos parámetros microbiológicos del agua residual doméstica.
- Comparar la calidad del agua tratada por los sistemas de tratamiento con la normativa nacional e internacional para valorar su potencial de reúso en riego agrícola.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1 MARCO TEÓRICO

6.1.1 Antecedentes del uso de agua residual para riego en el mundo

La utilización de aguas residuales en áreas agrícolas proviene de los tiempos antiguos en Atenas; sin embargo, la mayor proliferación de sistemas de aplicación de aguas residuales en el suelo ocurrió durante la segunda mitad del siglo XIX, principalmente en países como Alemania, Australia, Estados Unidos, Francia, India, Inglaterra, México y Polonia. En el periodo de la posguerra, la creciente necesidad de optimización de los recursos hídricos renovó el interés por esta práctica en países como África del Sur, Alemania, Arabia Saudita, Argentina, Australia, Chile, China, Estados Unidos, India, Israel, Kuwait, México, Perú, Sudán y Túnez¹³.

6.1.1.1 Antecedentes del uso de agua residual para riego

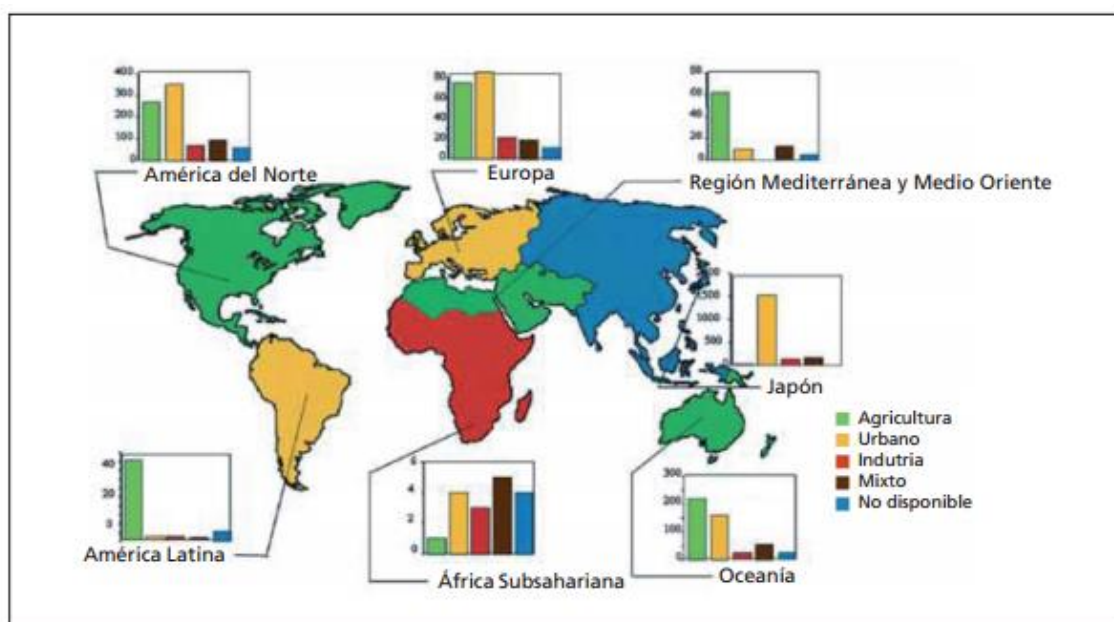
Actualmente existen más de 3.300 instalaciones o infraestructura de tratamiento de agua a nivel mundial con diversos grados de tratamiento y para diferentes usos como el riego agrícola, diseño urbano, recreación, procesamiento y refrigeración industrial, entre otras. La mayoría de éstos sistemas de tratamiento se encuentran en Japón (cerca de 1800) y los Estados Unidos (cerca de 800), le siguen Australia y la Unión Europea con 450 y 230 proyectos respectivamente. La zona mediterránea y el Medio Oriente tenían alrededor de 100 plantas, América Latina 50 y el África subsahariana 20¹⁴, esto evidencia claramente el desarrollo tecnológico y disponibilidad económica que posee los países desarrollados en la implementación de tratamientos de agua residual, situación que es aun poca en el sector latinoamericano.

Si bien en Latinoamérica no existe un gran desarrollo de infraestructura relacionada al tratamiento del agua residual en general, su aplicación en el riego agrícola es alta como lo muestra la Figura 1:

¹³ PARREIRAS. Tratamiento de aguas residuales disposición en suelo, Universidad Federal de Viçosa, 2005, p.6 [En línea] http://www.sarsan.com.br/docs/CURSO_SOBRE_tratamiento_esgoto.pdf [Citado el 10 de Octubre de 2015]

¹⁴ FAO. Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Informe sobre temas hídricos 2013, p.11 [En línea] <http://www.fao.org/docrep/017/i1629s/i1629s.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

Figura 1: Aplicación de agua residual en la agricultura a nivel mundial.



Fuente: Citado en FAO, 2013.

Como se evidencia en la región Latinoamericana los países que más utilizan el agua residual tratada o no tratada en el riego agrícola son: México, Argentina, Perú, Bolivia, y en menor medida Colombia. Algunos casos de estudio en estos países permiten generar una buena perspectiva del nivel de tratamiento de agua residual como el caso del Valle Mezquital en México donde se riegan 70 mil hectáreas de cultivo con agua residual, y como en Lima, Perú donde se producen 126.000 toneladas métricas al año de cebolla, espinaca, albahaca, acelga, perejil, cilantro, lechuga, col, coliflor, ají y tomate^{15,16}.

Se muestra en el Cuadro 1, una amplia gama de cultivos según la FAO¹⁷ que se riegan con aguas residuales sin tratar o tratadas parcialmente, teniendo en cuenta que, no presenta todo los cultivos, sino únicamente los más comunes:

¹⁵ MOSCOSO. Casos prácticos de uso de aguas residuales, 2004, p.13 [En línea] <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/aya2/tema13.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

¹⁶ MOSCOSO. Reúso de aguas residuales en Perú. Taller Regional para América sobre Aspectos de Salud, Agricultura y Ambiente, vinculados al uso de Aguas Residuales, organizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 1993 [En línea]

<http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/repin53/arp/arp.html> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

¹⁷FAO 2013, óp. cit, p. 15

Cuadro 1: Cultivos regados con agua residual sin tratar

Tipos	Ejemplos de cultivos
Cultivos agrícolas	Cebada, maíz (maíz verde), avena, trigo
Cultivos de fibras y semillas	Algodón, semillas de flores y hortalizas
Cultivos de hortalizas que puede consumirse crudos	Brócoli, repollo, coliflor, apio, ají, tomate verde (tomatillo), lechuga, pimiento, tomate
Cultivos de hortalizas que se procesarán antes del consumo	Alcachofa, frijol, cebolla, maní, papa, espinaca, zapallo, remolacha, girasol
Cultivos para forraje	Alfalfa, cebada, trébol, mijo, heno, maíz, pasto
Huertos y viñedos	Árboles frutales, manzanos, paltos, cítricos, limoneros, duraznos, pistachos, ciruelos, olivos, dátiles, vides
Invernaderos	Flores

Fuente: Citado en FAO, 2013.

Como se observa en el cuadro anterior, existe una amplia aplicación de las aguas residuales en el riego impulsando la producción en el sector agrícola junto con la conservación del agua. La mayoría de cultivos regados con agua residual son los industriales, y demás cultivos que no involucren un alto riesgo a la salud por el contacto con patógenos, por esto los cultivos para forraje, fibras, y semillas son ampliamente regados con aguas crudas o parcialmente tratadas.

Actualmente, el total de la tierra regada con aguas residuales sin tratar o parcialmente tratadas se estima en 20 millones de hectáreas en 50 países, lo que representa aproximadamente un 10% del total de las tierras de regadío¹⁸.

6.1.1.2 Uso de agua en la agricultura en Colombia

La demanda hídrica nacional ha sido calculada por el IDEAM,¹⁹ cuyos resultados arrojaron que en Colombia se utilizan aproximadamente 35.877 millones de metros cúbicos en 7 actividades específicas. En la agricultura se utilizan 19.386 millones de metros cúbicos como se evidencia en la Tabla 1:

¹⁸ FAO 2013, óp. cit, p. 12

¹⁹ IDEAM. Estudio nacional del agua Capítulo 5 Estimación de la Demanda del Agua 2010, p 175. [En línea] <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/021888.htm> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

Tabla 1: Demanda hídrica por sectores en Colombia.

Usos del agua	Total (Mm ³)	Participación (%)
Servicios	528	1,5
Industria	1.577	4,4
Pecuario	2.220	6,2
Acuícola	2.584	7,2
Doméstico	2.606	7,3
Energía	6.976	19,4
Agrícola	19.386	54,0
Total	35.877	100

Fuente: Estudio nacional del agua IDEAM, 2010²⁰.

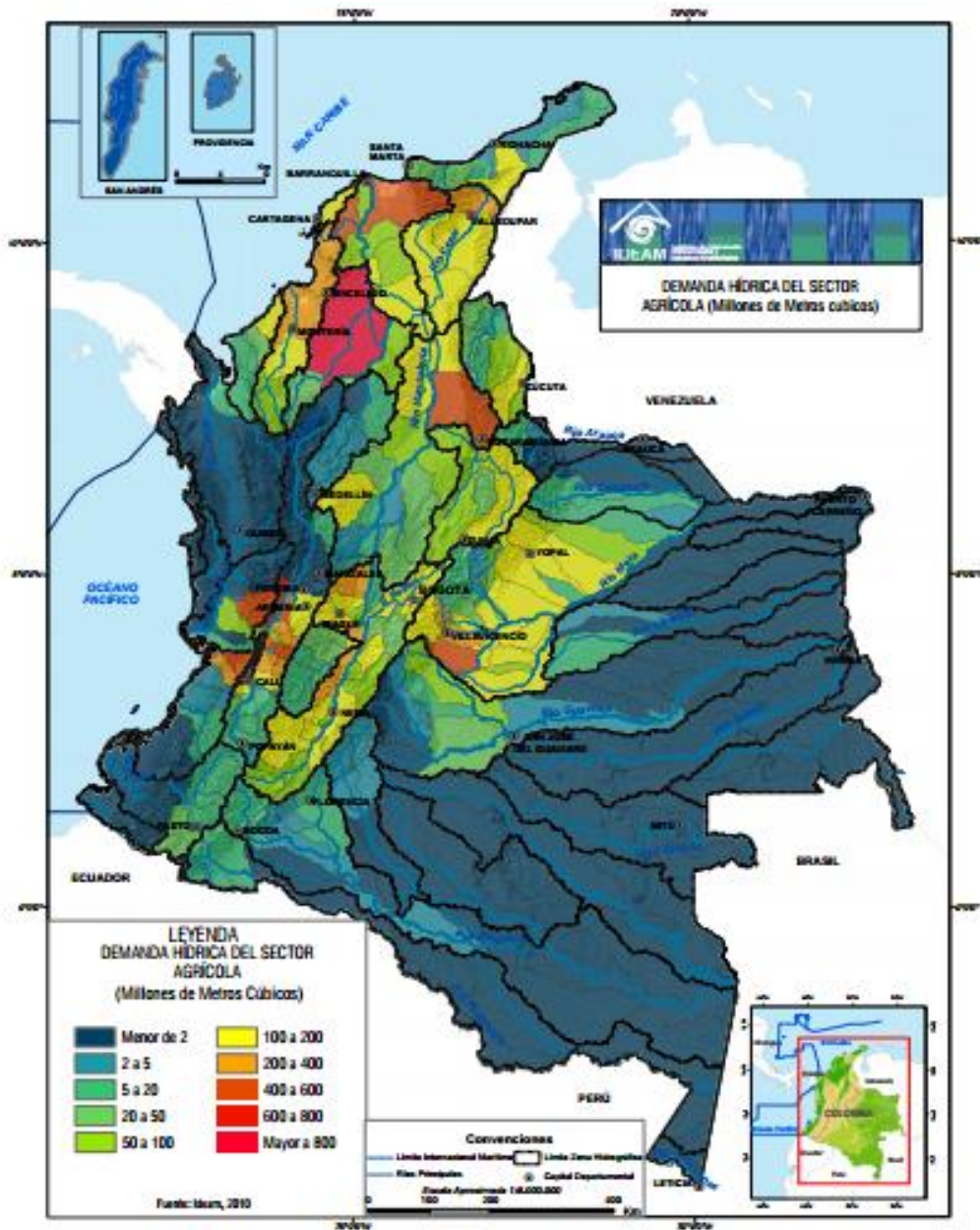
Los datos expuestos en esta tabla permiten dimensionar la gran demanda de agua en Colombia, teniendo en cuenta que la producción agrícola es significativa en el país, el consumo de agua en este sector evidencia la necesidad de generar alternativas en el aprovechamiento del recurso hídrico.

Los departamentos en los que se concentra la actividad agrícola nacional son: Tolima, Boyacá, Cauca, Cundinamarca, Huila, La Guajira, Nariño, Norte de Santander, Santander y Valle del Cauca, lo que representa un área regada con aguas residuales del 1.230.193 ha, con 27% de agua residual tratada y 73% sin tratar, por lo general diluida con aguas superficiales²¹. La demanda hídrica nacional se puede observar explícitamente en el siguiente mapa de Colombia:

²⁰ IDEAM, óp. Cit, p. 175

²¹ MINISTERIO DE AGRICULTURA. Proyecto: Desarrollo de capacidades del uso seguro de aguas residuales para la agricultura. Reporte Nacional 2011, p. 17 [En línea]
http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/127/COLOMBIA.pdf [Citado el 10 de Octubre de 2015]

Figura 2: Mapa de la demanda hídrica del sector agrícola en Colombia



Fuente: Estudio nacional del agua IDEAM, 2010²².

Teniendo en cuenta que en la región Andina y Caribe se desarrollan la mayor producción agrícola, se observa una alta demanda hídrica en el norte del país, obedeciendo principalmente a las condiciones agro-climatológicas locales y la gran extensión de los cultivos. No obstante, en departamentos como el Tolima, Valle del

²² IDEAM, óp. Cit, p. 177

Cauca y Huila son notables los requerimientos de agua para cultivos como caña de azúcar, arroz, y café²³.

6.1.1.3 Agua residual utilizada en la agricultura en Colombia

Como lo mencionado anteriormente, en el país no hay una cobertura de tratamiento de agua residual bien conformada, y un porcentaje significativo de aguas sin tratar se aplica a cultivos colombianos. No se cuenta con documentación sobre la implementación de tratamientos de agua residual doméstica para uso en el riego de cultivos, sin embargo se conocen de algunos casos en los que exitosamente se aprovechan este tipo de aguas, ofreciendo beneficios a la actividad productiva.

En la ciudad de Ibagué, se evaluó la viabilidad de una propuesta para el uso productivo de las aguas residuales. Los cultivos dentro del plan agrícola de reusó serían: arroz, sorgo, pastos, soya, y algodón. La tecnología de tratamiento de aguas residuales seleccionada fue lagunas facultativas con tratamiento preliminar y primario. El total de aguas residuales para tratar fue de 1.438,66 L/s²⁴.

Por otro lado en las regiones de producción agrícola en la sabana de Bogotá, se utiliza el agua del rio Bogotá para regar 3.500 ha de pastos, flores y hortalizas, cuyo tratamiento empleado es el de humedales artificiales que hacen parte del distrito de riego La Ramada²⁵.

En el departamento del Valle del Cauca se han realizado investigaciones implementando sistemas de tratamiento como lagunas facultativas, lagunas de estabilización y humedales, así como análisis de pertinencia de riego agrícola en distritos de riego como el de Palmira²⁶.

Son pocas las experiencias documentadas referente a este tema, sin embargo centros de investigación asociados a universidades de Colombia han empezado a generar conocimiento respecto a estas prácticas. Universidades como la Tecnológica de Pereira, Universidad del Valle y la Universidad de Pamplona han iniciado investigaciones que permitirán entrar en detalle a los sistemas de tratamiento naturales y el aprovechamiento del agua residual en riego de cultivos²⁷.

6.1.2 Organismos encontrados en las aguas residuales

Las aguas residuales urbanas están formadas por una mezcla de aguas domésticas de lavado de ropa, platos y ducha este tipo de aguas se les denomina aguas grises

²³ IDEAM, óp. cit, p. 185

²⁴ CEPIS. Inventario de la Situación Actual de las Aguas Residuales Domésticas en Colombia, Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial, 2003, p. 24 [En línea] http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/proyecto/inventario/col_in.pdf [Citado el 5 de Octubre de 2015]

²⁵ SILVA et al., óp. cit, p. 374-379

²⁶ Ibíd. p. 356

²⁷ Ibíd. p. 357

contienen grasas, partículas orgánicas de alimentos, pelo y otros contaminantes²⁸, y por las aguas negras que incluyen sustancias fecales y orina, procedentes de desechos orgánicos humanos²⁹.

Las aguas residuales son una mezcla compleja, rica en principios nutritivos de toda clase y en los más variados estados de degradación (grasas, ácidos grasos, proteínas, aminoácidos libres, hidratos de carbono, sales minerales, gases en disolución etc. Esta variedad de nutrientes permite la proliferación en las aguas fecales de una gran variedad de especies bacterianas, hongos, protozoos, así como animales superiores como parásitos intestinales³⁰.

En la Cuadro 2 se muestran los microorganismos encontrados en las aguas residuales más importantes en aspectos sanitarios y sus enfermedades asociadas al entrar en contacto con los seres humanos:

Cuadro 2: Microorganismos presentes en aguas residuales y enfermedades asociadas a estos.

Microorganismos	Enfermedades	Descripción
<i>Eschechiria coli</i>	Gastroenteritis	Diarrea e intoxicación
<i>Salmonella sp</i>	Salmonelosis	Fiebre alta, diarrea, úlceras en el intestino delgado
<i>Shigella sp</i>	Shigelosis	Infección aguda del revestimiento del intestino.
<i>Cryptosporidium</i>	Criptosporidiosis	Diarrea
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	Es una infección del intestino delgado que ocasiona una gran cantidad de diarrea acuosa
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis	Diarrea, náuseas, indigestión
<i>Taenia saginata</i>	Teniasis	Tenia (buey)
<i>T. solium</i>	Teniasis	Tenia (cerdo)

Fuente: CEPIS/OPS-OMS 2002³¹ (Ver anexo 1).

²⁸ NARANJO, Francisco. Alternativas ecológicas para el manejo de aguas residuales N° 152, 2010. Asesor de CEGESTI [En línea]

http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_152_130611_es.pdf [Citado el 10 de Octubre de 2015]

²⁹ KESTLER, Patricia. Uso, Reúso y reciclaje del agua residual en una vivienda 2004 [En línea]

http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/fulltext/uso_reuso.pdf [Citado el 10 de Octubre de 2015]

³⁰ MORENO. Conceptos básicos de microbiología de las aguas subterráneas. Capítulo 4 1998 [En línea]

[http://doc.igme.es/BUSCADORHIDRO/DOCUMENTOS/LIBROS/CALIDAD%20Y%20CONTAMINACION%20DE%20ACUIFEROS/LIBRO008\(FOTO%20PEQUE%C3%91A\)/LIBRO008.PDF](http://doc.igme.es/BUSCADORHIDRO/DOCUMENTOS/LIBROS/CALIDAD%20Y%20CONTAMINACION%20DE%20ACUIFEROS/LIBRO008(FOTO%20PEQUE%C3%91A)/LIBRO008.PDF) [Citado el 10 de Octubre de 2015]

³¹ ROJAS, Ricardo. Curso Internacional "Gestión integral de tratamiento de aguas residuales" Conferencia Eliminación de Microorganismos por diversos Procesos de Tratamiento CEPIS, 2002 [En línea]

<http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/micro.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

Dentro de los organismos más importantes para el análisis microbiológico de las aguas residuales están las bacterias coliformes, los huevos de helmintos y algunos protozoos. Esto se debe a que son organismos que se encuentran en gran número en estas aguas y que las enfermedades que producen son comunes en los humanos, y es sumamente importante poder remover a estos microorganismos del agua residual para riego, y evitar afecciones a la salud.

6.1.3 Tratamientos naturales de agua residual

Los tratamientos naturales son sistemas de depuración que engloban aquellos procedimientos o técnicas en los que la eliminación de las sustancias contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas se produce por componentes del medio natural, no empleándose en el proceso ningún tipo de aditivo químico. Habitualmente se diferencian dos grandes grupos de técnicas de depuración natural: los métodos de tratamiento mediante aplicación del agua sobre el terreno, y los sistemas acuáticos. En todos ellos, el efecto depurador se debe a la acción combinada de la vegetación, del suelo y de los microorganismos presentes en ambos, y en menor medida, a la acción de plantas y animales superiores³².

Los procedimientos naturales se caracterizan, en general, por su escasa necesidad de personal de mantenimiento, consumo energético reducido y baja producción de fangos^{33,34}.

Las ventajas de los tratamientos de agua residual, dependen en gran parte de la calidad de agua residual que tratan, y en su capacidad de disponer a estas aguas en un ambiente favorable. Además las aguas tratadas ofrecen un alto contenido de nutrientes que pueden ser utilizados por las plantas y el suelo con un valor fertilizante, lo que impacta positivamente la producción del cultivo, permitiendo expandir la frontera agrícola. Los bajos costos de implementación y la poca demanda de conocimiento técnico en su operación hace de estos tratamientos técnicas muy interesantes con un gran potencial de aplicación³⁵.

Los tratamientos naturales comúnmente se clasifican en dos grandes grupos, dependiendo el medio en que se realice la depuración el primero es tratamientos en el terreno y el segundo tratamientos acuáticos.

6.1.3.1 Tratamientos naturales en el terreno

A continuación se describen los diferentes tratamientos que se implementan en terreno la capacidad hidráulica hace referencia al volumen de agua que el sistema puede tratar

³² MORENO et al. La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno fundamentos y casos prácticos Capítulo 2, 2003 [En línea] http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/indice.htm [Citado el 10 de Octubre de 2015]

³³ SILVA et al., óp. cit, p. 374-379

³⁴MORENO, óp. cit, p. 13

³⁵ ROSKOZNY et al. Natural Technologies of Wastewater Treatment 2014 [En línea] http://www.gwp.org/Global/GWP-CEE_Files/Regional/Natural-Treatment.pdf [Citado el 10 de Octubre de 2015]

en un determinado tiempo depende de las características del sistema, está dado en volumen/ tiempo.

Los tratamientos en el terreno se agrupan en los siguientes sistemas:

6.1.3.1.1 Filtro Verdes

Consiste básicamente en la aplicación de un caudal controlado de agua residual sobre la superficie del terreno, donde previamente se ha instalado una masa forestal o un cultivo el tratamiento, los métodos de depuración se realizan por una acción conjunta del suelo, los microorganismos y las plantas por medio de una triple acción: física (filtración), química (intercambio iónico, precipitación, fenómenos de óxido-reducción, y degradación biológica de la materia orgánica.

Este tratamiento tiene una capacidad hidráulica entre 0,5 y 6 m³/año, y un porcentaje de remoción de carga orgánica, con reducciones de DBO₅ del orden del 90% y de sólidos en suspensión del 95% destacando, además, el alto rendimiento en eliminación de microorganismos patógenos, fósforo y compuestos nitrogenados (más del 80%)³⁶.

6.1.3.1.2 Infiltración rápida

Consiste en la aplicación controlada del agua residual sobre balsas superficiales construidas en suelos de permeabilidad media o alta, no se implementa vegetación, el agua se depura por procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar al atravesar el agua residual el suelo, para implementar el sistema tiene una profundidad entre 18 y 20 metros. Estos tratamientos tienen una capacidad hidráulica de 10 y 60 cm/día, y tiene reducciones medias de DBO₅ y de sólidos en suspensión alrededor del 90% y una elevada eliminación de patógenos, entre el 70% y el 95%³⁷.

6.1.3.1.3 Infiltración lenta

Se infiltra por la superficie de terreno o percola vertical y horizontalmente en el terreno, para este tratamiento se implementa cobertura vegetal el agua se puede consumirse por evapotranspiración, el sistema tiene una pendiente del 5 al 20%, un nivel freático de 1 a 1.5 m, la permeabilidad del suelo debe ser lenta, el agua residual se depura por procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar cuando este es tratado por el

³⁶ SILVA et al., óp. cit, p. 5

³⁷ MORENO et al. La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno fundamentos y casos prácticos Capítulo 2 2003 [En línea]
http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/indice.htm [Citado el 10 de Octubre de 2015]

suelo y las plantas, el sistema depura 6-125 m³/m², la remoción de DBO₅ es de 94-99 %, de Nitrógeno 65-95%, de fosforo 75-99% y en Coliformes totales > 99%³⁸.

6.1.3.1.4 Escorrentía superficial

La técnica consiste en forzar la escorrentía del agua residual, mediante riego por circulación superficial en láminas, sobre un suelo previamente acondicionado (en pendiente y con vegetación no arbórea, los suelos deben tener una pendiente de 2 al 8%, se implementa en superficies muy lisas para que el agua forme una lámina sobre el suelo. El agua se depura por procesos físicos, químicos y biológicos, al discurrir por bancales con suelos o estratos superficiales relativamente impermeables, el tratamiento tiene reducciones de nitrógeno, de DBO₅ y de sólidos en suspensión en torno al 90 y 70 %³⁹.

6.1.3.1.5 Lechos de Turba

El sistema está formado por lechos de turba, la turba está formada por los restos de materia orgánica vegetal disgregada y parcialmente descompuesta, procedente de la antigua vegetación de áreas pantanosas ⁴⁰ por tanto estos lecho de turba son láminas de este material por donde el agua residual circula a través de ellas.

Cada lecho descansa sobre una delgada capa de arena, soportada, a su vez, por una capa de grava. El agua se depura por las propiedades de absorción y adsorción de la turba, así como la actividad bacteriana que se desarrolla en su superficie. Tiene capacidad para depurar grandes caudales, elimina alrededor del 80% de DBO₅ y el 90% de sólidos en suspensión. El terreno donde se asienta cada lecho debe ser impermeable para garantizar la no contaminación de las aguas subterráneas⁴¹.

6.1.3.1.6 Lechos de arena

Son lechos o láminas de material granular, de tamaño de grano relativamente uniforme, adecuadamente drenados en el fondo, el agua se depura por las propiedades de absorción y adsorción de la granulometría, así como la actividad bacteriana que se desarrolla en su superficie, tiene unos porcentajes de remoción de sólidos suspendidos

³⁸ Silva et al 2008 Reusó de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. Artículo Científico. Agronomía Colombiana Vol. 26 No.2 374-379 [En línea]

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652008000200020 [Citado el 10 de Octubre de 2015]

³⁹ INSTITUTO GEOGRÁFICO Y MINERO DE ESPAÑA, Nuevas tecnologías para el saneamiento, depuración y reutilización de las aguas residuales en la provincia de Alicante. Capítulo III Métodos naturales de tratamiento 1995. [En línea]

<http://doc.igme.es/BUSCADORHIDRO/DOCUMENTOS/LIBROS/TECNICAS%20HIDROGEOLOGICAS/LIBRO033/LIBRO033.PDF> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁴⁰ NUÑEZ. Turba y zeolita como soportes de inoculantes microbianos con acción fertilizante. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) ISSN: 0138-6204 2009 [En línea]

<http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120660004.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁴¹ MORENO et al. La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno fundamentos y casos prácticos Capítulo 2. 2003 [En línea]

http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/indice.htm [Citado el 10 de Octubre de 2015]

85-95%, en remoción de DBO5 80-93%, en nitrógeno 30-40%, en fósforo 30-45% y en Coliformes totales 60-90%.

La disposición de los filtros puede ser muy variada, incluyendo tanto filtros enterrados como sobre la superficie del terreno. Se ampliará la información de este tratamiento en el numeral **6.1.3.4**

6.1.3.2 Métodos acuáticos

Estos sistemas son depurados por acción principal del medio acuático, participando en el proceso plantas emergentes (especialmente sus raíces) y la actividad microbiológica asociada⁴².

Los tratamientos acuáticos se agrupan en los siguientes sistemas:

6.1.3.2.1 Lagunaje

La depuración por lagunaje de aguas residuales consiste en el almacenamiento de éstas durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y de las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de los microorganismos presentes en el medio acuático, reacciones biológicas, químicas y físicas, que ocurren en las lagunas y que tienden a estabilizar el agua residual, el agua es depurada por procesos que tienen relación con la sedimentación, oxidación, fotosíntesis, digestión, aireación y evaporación. Las lagunas tienen una clasificación y depende de las condiciones a las que se sometan, así serán diferentes los microorganismos y las remociones de carga orgánica para cada tipo de laguna.

Las primeras son las lagunas anaerobias, realizan su proceso de depuración es mediante la fermentación anaerobia, este proceso tiene lugar en condiciones anóxicas lo quiere decir sin la presencia de oxígeno. En estos procesos, participan cuatro grupos microbianos: las bacterias hidrolíticas, bacterias acidogénicas bacterias acetogénicas y las bacterias metanogénicas, la profundidad de la laguna es superior a 2m, y tiene una remoción de 70% de DBO₅ y sólidos en suspensión.

El segundo tipo de lagunas son las lagunas facultativas, en su implementación forman una zona aerobia próxima a la superficie, una zona anaerobia en el fondo, donde se dan procesos de fermentación, y una zona intermedia que contiene bacterias facultativas, la profundidad apropiada es de 1 a 2 m⁴³.

El tercer tipo son las lagunas aerobias o de maduración son estanques de poca profundidad, entre 0.2 y 1 metro, con una producción máxima de algas y en las que se supone que toda la masa de agua está en condiciones aerobias se ampliará la información de este tratamiento en el numeral **6.1.3.5**

⁴² INSTITUTO GEOGRÁFICO Y MINERO DE ESPAÑA, óp. cit, p.27

⁴³ ibíd., p. 29

6.1.3.2.2 Humedales

Los humedales son terrenos inundados con profundidades de agua normalmente inferiores a 0,6 m con plantas emergentes, el agua fluye continuamente y la superficie libre permanece al nivel del suelo, tiene una capacidad de tratamiento de 3 a 20 m/año. La vegetación presente en estos sistemas proporciona superficies adecuadas para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia del oxígeno a la columna de agua, y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar⁴⁴.

Los humedales se clasifican en dos, los humedales naturales y los artificiales, los humedales naturales son ecosistemas protegidos por tanto no son aptos para tratar aguas residuales.

Los humedales artificiales tienen un fondo o base impermeable sobre la que se deposita un lecho de gravas, suelo u otro medio para el desarrollo de las plantas, que constituyen el principal agente depurador, los humedales artificiales se clasifican en dos los Humedal de superficie libre de agua (FWS) suelen consistir en balsas o canales paralelos con el fondo constituido por suelo relativamente impermeable o con una barrera superficial, vegetación emergente, y niveles de agua poco profundos (0,1 a 0,6 m) También se emplean con el objetivo de creación de nuevos hábitats para la fauna y flora, o para mejorar las condiciones de terrenos pantanosos naturales, y los Humedal de flujo subsuperficial (SFS) se diseñan con el objeto de proporcionar un tratamiento secundario avanzado. Consisten en canales o zanjas con fondos relativamente impermeables rellenos de cantos o arena para el crecimiento de vegetación emergente⁴⁵.

6.1.3.2.3 Cultivos acuáticos

Son básicamente una variante de los humedales artificiales FWS, en la que se introduce un cultivo de plantas flotantes, como los jacintos de agua o las lentejas de agua eliminan determinados componentes de las aguas a través de sus raíces, que constituyen un buen sustrato, depuran 6 m/año y tienen una profundidad de 0,5 y 1,8 m. Para aumentar la capacidad de tratamiento y asegurar el mantenimiento de las condiciones aerobias necesarias para el control biológico de los mosquitos, en los sistemas de plantas acuáticas flotantes se han empleado sistemas complementarios de aireación⁴⁶.

Para este trabajo los dos sistemas que se van implementar serán la laguna de maduración y filtración lenta en arena a continuación se describen ampliamente cada sistema.

⁴⁴ SILVA et al., óp. cit, p. 356

⁴⁵ Silva et al., óp. cit, p. 352

⁴⁶ INSTITUTO GEOGRÁFICO Y MINERO DE ESPAÑA, óp. cit, p.21

6.1.3.4 Filtro lento en arena

El fundamento de este sistema está en hacer circular el agua cruda a través de un manto poroso de arena, con diferentes granulometrías, en el transcurso del proceso las impurezas entran en contacto con la superficie de las partículas del medio filtrante y son retenidas, desarrollándose adicionalmente procesos de degradación química y biológica que reducen a la materia retenida a formas más simples, las cuales son llevadas en solución o permanecen como material inerte hasta un subsecuente retiro o limpieza⁴⁷.

El proceso de depuración ocurre en un rango de 12 a 24 horas, durante este tiempo bajo la influencia de la luz del sol se produce el crecimiento de algas, las cuales absorben bióxido de carbono, nitratos, fosfatos y otros nutrientes del agua para formar material celular y oxígeno. El oxígeno así formado se disuelve en el agua y entra en reacción química con las impurezas orgánicas, haciendo que éstas sean más asimilables por los microorganismos⁴⁸.

El agua se filtra entre los granos de arena con un flujo laminar ósea siguiendo una trayectoria suave, facilitando la acción de las fuerzas centrífugas sobre las partículas y la adherencia a la superficie de los granos de arena. En los poros o espacios vacíos del medio filtrante (los cuales constituyen aproximadamente el 40% del volumen) se desarrolla un proceso activo de sedimentación, fenómeno que se incrementa apreciablemente por la acción de fuerzas electrostáticas y de atracción de masas⁴⁹.

El filtro lento en arena realiza la depuración del agua por medio de los mecanismos de remoción físicos-químicos y mecanismos de remoción biológicos, estos se explican a continuación:

Mecanismos de remoción: la remoción de partículas se realiza por los mecanismos, de transporte (físicos) y adherencia (químicos) que actúan sobre las partículas acarreadas por el agua.

Mecanismos de transporte: esta etapa de remoción es básicamente hidráulica ilustra los mecanismos mediante los cuales ocurre la colisión entre las partículas y los granos de arena. Estos 5 mecanismos son principalmente el de intercepción sedimentación y difusión.

a) Cernido: el mecanismo de cernido actúa exclusivamente en la superficie de la arena y sólo con aquellas partículas de tamaño mayor que los intersticios de la arena. Se colmata rápidamente la capa superficial, acortando las carreras de filtración. Los sólidos grandes, especialmente material filamentosos como las algas, forman una capa esponjosa sobre el lecho que mejora la eficiencia del cernido, actuando como un pre-

⁴⁷ CANEPA. Planta de Tratamiento de Filtro Lentos, CEPIS 2013 [En línea]
<http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/tratagua/lenta/lenta1.html> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁴⁸ CEPIS Filtración Lenta en Arena, 1989 p.2 [En línea]
<http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan/007697/07697-01b.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁴⁹ *Ibid.* pág. 6

filtro sobre el lecho de arena, protegiéndolo de una rápida colmatación y permitiéndole cumplir con su función de filtración.

b) Intercepción: es una de las formas en que las partículas pueden colisionar con los granos de arena. La intercepción solamente puede ocurrir si la partícula conducida por las líneas de flujo se acerca al grano de arena, de modo que roce la superficie de éste. Cuando más grande es la partícula, será más factible que ocurra la intercepción

c) Sedimentación: la fuerza de gravedad actúa sobre todas las partículas, produciendo la componente vertical de la resultante de la velocidad de conducción, la cual puede causar la colisión de la partícula con el grano de arena. Su influencia es perceptible solamente con partículas mayores de 10 mm.

d) Difusión: es el tercer mecanismo de transporte representativo en la filtración lenta. La energía térmica de los gases y líquidos se pone de manifiesto en un movimiento desordenado de sus moléculas. Cuando esas moléculas colisionan con una pequeña partícula, ésta también empieza a moverse en forma descontrolada, en una serie de pasos cortos (Figura 3).

e) Flujo intersticial: el flujo entre dos líneas cualesquiera de corriente es similar y el espacio dentro del cual discurren se denomina conducto cilíndrico. La configuración de estos conductos cilíndricos es tortuosa, se bifurca, se unen y se vuelven a bifurcar en diferentes puntos. Cuanto más pequeños los granos de arena, mayor la probabilidad de colisión. La porosidad del medio es mayor y, por lo tanto, hay mayor cantidad de conductos, produciéndose mayor número de bifurcaciones.

Mecanismo de adherencia: el desarrollo de la capa biológica proporciona a los granos de arena una superficie absorbente, adicional las enzimas extracelulares coagulan las partículas, favoreciendo este proceso de adhesión, este mecanismo se basa en algunos factores químicos y electroquímicos los cuales son:

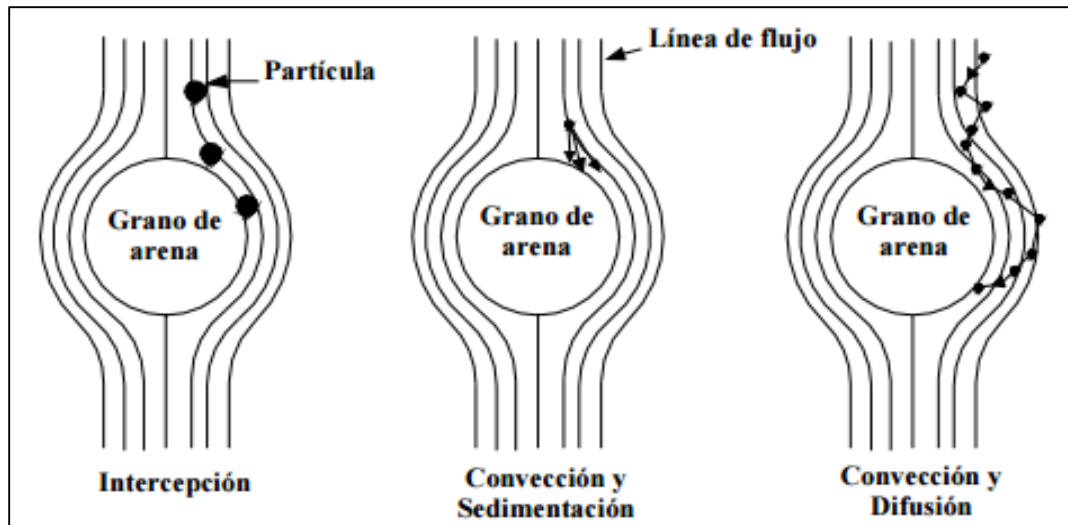
a) Fuerza de Van der Waals: entre las partículas del medio filtrante se generan fuerzas atractivas debido al movimiento de los electrones en sus orbitas, lo que provoca que las partículas se unan entre sí.

b) Fuerzas electroestáticas: el medio filtrante puede tener carga contraria a los sólidos suspendidos del agua residual, por tanto se genera una fuerza de atracción entre las partículas si los granos del lecho son negativos y los sólidos neutros, en este caso la barrera de energía ha desaparecido y todo contacto produce retención.

c) Puente químico: este proceso ocurre cuando posterior al filtro lento de arena se ha implementado un tratamiento de coagulación- floculación, en este proceso se forman cadenas de polímeros que dejan libre los segmentos extendidos y se adhieren a los granos del filtro⁵⁰.

⁵⁰ PEREZ, Arturo. Tratamiento de aguas, Filtración. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas, p. 136-137[En línea]

Figura 3: Mecanismos de transporte en el filtro lento en arena.



Fuente: CEPIS-OPS.

Se debe tener en cuenta que el filtro se considera maduro cuando la película biológica ha llegado a su máximo desarrollo, aun no se han establecido valores del desarrollo máximo de esta película, se estima que el punto máximo es cuando alcanza su mayor punto de remoción, aunque estos valores pueden variar según las condiciones del agua a tratar, las características del filtro y los factores ambientales.

Esta película biológica se le denomina ***schmutzdecke*** la cual es originaria del término alemán 'capa sucia'. Esta película pegajosa es generalmente de color marrón rojizo, y se caracteriza porque en ella han ocurrido procesos de descomposición de la materia orgánica, manganeso, hierro y sílice. De esta manera actúa como un filtro fino que depura y elimina las partículas coloidales en el agua cruda y también funciona como una zona precursora de la actividad biológica, proporcionando cierta degradación de los compuestos orgánicos solubles en el agua cruda⁵¹. Casi toda la capacidad de depuración se adjudica al *schmutzdecke*⁵².

Mecanismo biológico: al iniciarse el proceso, las bacterias predadoras o benéficas transportadas por el agua pueden multiplicarse en forma selectiva, contribuyendo a la formación de la película biológica del filtro y utilizando como fuente de alimentación el

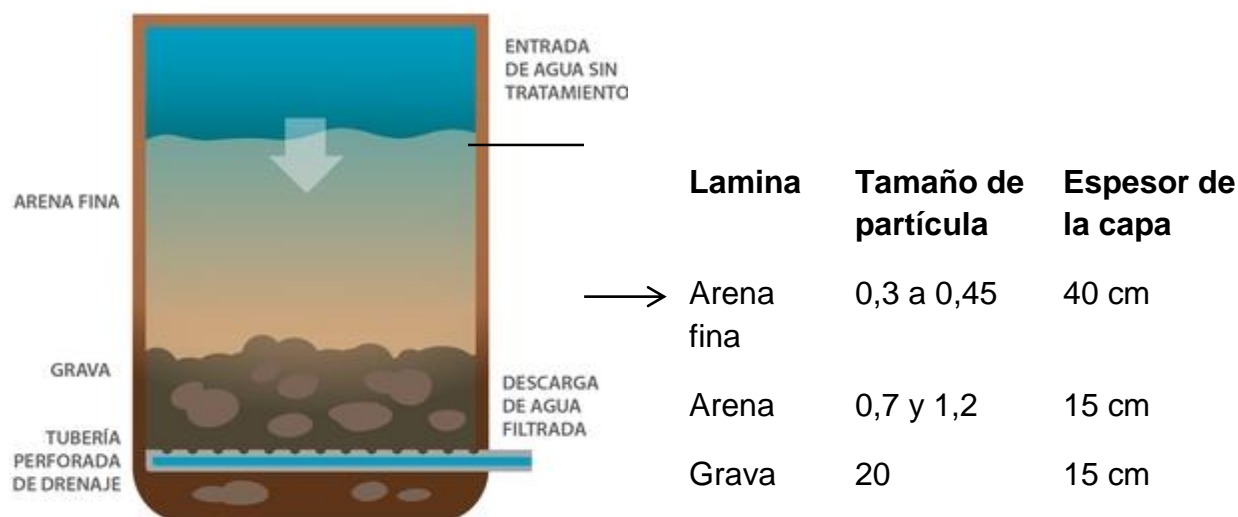
http://www.bdigital.unal.edu.co/70/6/45 - 5_Capi_4.pdf [Consultado el 28 de abril de 2016]

⁵¹ BIOLOGICAL ACTION, 2004 [En línea] http://www.biosandfilter.org/biosandfilter/index.php/item/320#ref_01 [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁵² HUISMAN L. *et al.* Filtración lenta en arena. Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades; tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo, 1998. CEPIS Lima, p.10 [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/020867/020867-16.pdf> [Citado el 25 de Abril de 2016]

depósito de materia orgánica. Estas bacterias oxidan la materia orgánica para obtener la energía que necesitan para su metabolismo (desasimilación) y convierten parte de ésta en material necesario para su crecimiento (asimilación). Así, las sustancias y materia orgánica muerta son convertidas en materia viva. Los productos de desasimilación son llevados por el agua a profundidades mayores para ser utilizados por otros organismos⁵³.

Figura 4: Configuración general de un filtro lento en arena.



Fuente: OPS 1999⁵⁴.

En la Figura 4 se muestran los diferentes estratos de granulometría para los filtros, la información contenida en la tabla está relacionada con un tanque de 1000 L, una de las mayores ventajas de estos sistemas es que pueden ser aplicados para diferente volúmenes de agua, en cualquier caso la efectividad de remoción es óptima.

Además de tener en cuenta el tamaño de la partícula, es fundamental determinar el coeficiente de uniformidad para la arena. Este coeficiente es la medida de uniformidad del suelo que se establece bajo la curva granulométrica y el coeficiente de curvatura, el cual es un dato complementario para definir la uniformidad de la curva⁵⁵.

Para el diseño de los filtros se deben tener en cuenta parámetros básicos, que condicionaran el funcionamiento de este tratamiento los más importantes son:

⁵³ CANEPA. Planta de Tratamiento de Filtro Lentos, CEPIS 2013 [En línea] <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/tratagua/lenta/lenta1.html> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁵⁴ OPS. Filtros lentos de arena. Tratamiento domiciliar 1997 [En línea] <http://www.col.ops-oms.org/saludambiente/guia-filtros.htm> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁵⁵ ESCUELA DE INGENIERIA DE CONSTRUCCION. Análisis granulométrico, p.4 [En línea] http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/granulometria.pdf [Citado el 12 de Octubre de 2015]

La carga orgánica: esta hace referencia a la masa de sustrato (materia orgánica medida como DBO₅) que se le aplica diariamente al filtro⁵⁶.

Se utiliza la fórmula:

$$C_o = L_i * Q$$

Y para la carga orgánica superficial

$$C_s = \frac{L_i * Q}{A_s}$$

Donde:

C_o= Carga orgánica (kg DBO/día)

L_i= kg DBO del efluente

Q= Caudal

C_s= carga superficial (kg DBO/m²/día)

El área superficial permite determinar la carga orgánica que ingresa al filtro por cada m², para determinar este parámetro se utiliza la siguiente formula⁵⁷:

$$A_s = \frac{Q * C}{N * V_f}$$

Donde:

A_s = Área superficial

Q = Caudal

C = turnos de operación

N = número de unidades

V_f= velocidad de filtración

La velocidad de filtración o tasa de filtración o también conocida como la tasa de carga hidráulica, esta expresa el volumen por unidad de área por unidad de tiempo, es la velocidad a la que atraviesa el agua a través del lecho filtrante⁵⁸ por acción de la fuerza de gravedad, las unidades de la velocidad de filtración son m/h.

⁵⁶ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Diseño de lagunas de estabilización 2007. ISBN: 978-968-817-880-5 México D.F. p. 28 [En línea]
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/10DisenoDeLagunasDeEstabilizacion.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁵⁷ TORRES Y VILLANUEVA. Filtro de Arena Lento. Universidad Piloto de Colombia p. 44 [En línea]
<http://www.unipiloto.edu.co/wp-content/uploads/2013/11/El-filtro-de-arena-Lento-a-color-para-la-web.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

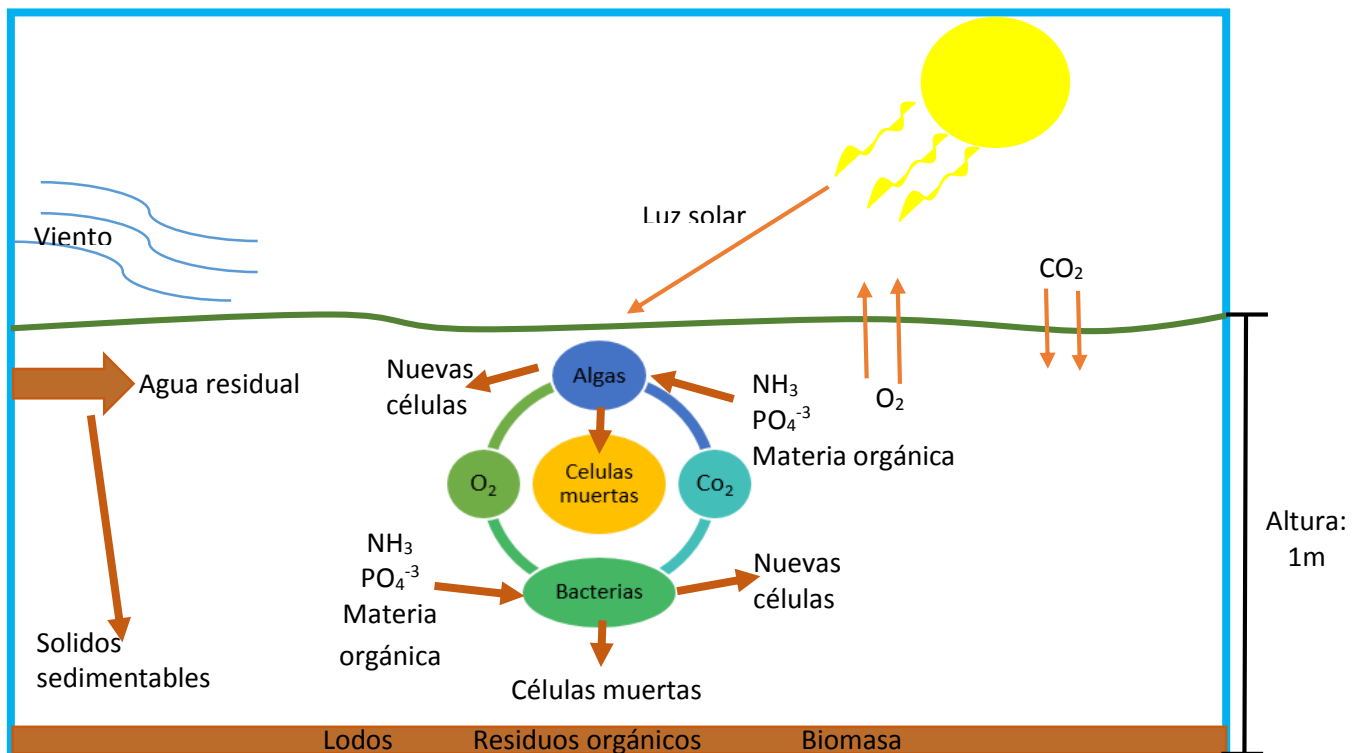
⁵⁸ DONISON Kori. Household scale slow sand filtration in the Dominican Republic, 2004. Thesis of master of engineering in civil and Environmental. SB Civil and Engineering Environmental Engineering Massachusetts Institute of technology, p. 14

6.1.3.5 Tratamiento de Laguna de maduración

Las lagunas de maduración o pulimento son estanques utilizados como proceso de tratamiento terciario diseñados con el propósito de reducir los agentes patógenos y el contenido de bacterias coliformes presentes en el agua residual doméstica. Además busca mejorar las condiciones del agua tratada consolidando su depuración física química⁵⁹.

Los procesos biológicos que se realizan en las lagunas de maduración son similares a los de las lagunas aerobias, aunque la fuente de carbono proviene principalmente de las bacterias formadas en las etapas previas del tratamiento. El nitrógeno amoniacal es convertido a nitratos mediante el oxígeno presente en la laguna por fotosíntesis de las algas y por reacción natural⁶⁰. Los mecanismos de remoción se muestran en la siguiente figura:

Figura 5: Mecanismos de remoción de las lagunas aerobias.



Fuente: Autores 2016, adaptada de Tilley 2008.

Las especificaciones técnicas de la construcción y diseño de las lagunas de maduración están condicionadas al nivel de depuración deseada. Para diferentes niveles de

⁵⁹ YANEZ, Fabián. Lagunas de Estabilización CEPIS Lima Perú 2007 [En Línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/04828/04828-03.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁶⁰ *Ibid.*, p. 3

remoción de coliformes se establecen los parámetros de diseño detallados, sin embargo de modo general se denotan los siguientes:⁶¹

- Profundidad entre 1 y 1,5 metros
- Tiempo de retención hidráulica de 5 a 10 días
- Relación longitud ancho : 2:1 o 4:1
- Remoción de coliformes:

La ecuación de la variabilidad de la remoción de coliformes fecales planteada por Marais⁶² es la siguiente:

$$\frac{N}{N_o} = \frac{1}{K \cdot t + 1}$$

Donde:

N: concentración de coliformes en el afluente (NMP)

No: concentración de bacterias en el efluente (NMP)

K: constante de reacción mono molecular (1/días)

T: tiempo de retención hidráulico en días

Con adecuado dimensionamiento pueden conseguirse remociones de coliformes fecales mayores que 99,99%.

Las lagunas se implementan para desinfectar el agua residual, por tanto se debe tener en cuenta las cargas orgánicas que se le aplican, al igual que el filtro lento, se cuantifica la masa de materia orgánica que ingresa a la laguna ⁶³ Se utiliza la fórmula:

$$C_o = L_i \cdot Q$$

Y para la carga orgánica superficial

$$\frac{C_s = L_i \cdot Q}{A}$$

Donde:

C_o= Carga orgánica (kg DBO/día)

L_i= kg DBO del efluente

Q= Caudal

C_s= carga superficial (kg DBO/m²/día)

A= área de la laguna

Un parámetro importante para el funcionamiento óptimo de la laguna es el grado de mezcla o el tipo de flujo que ocurrirá en la laguna, este flujo está ligado directamente al caudal y a la dispersión uniforme del agua residual en la laguna, pueden ocurrir tres

⁶¹ROJAS. Lagunas Facultativas en serie y en paralelo. Investigador Asociado en Tratamiento de Aguas Residuales Criterios de dimensionamiento. CEPIS 1990 [En línea] <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind42/lagunas/lagunas.html> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁶² POLPRASERT, DISSANAYAKE y .THANH, Bacterial die-off kinetics in waste stabilization ponds 1983 p. 285 [En línea] <http://www.bvsde.ops-oms.org/muwww/fulltext/repind42/bacterial/bacterial.html> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁶³ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Diseño de lagunas de estabilización 2007. ISBN: 978-968-817-880-5 México D.F. p. 28 [En línea] <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/10DisenoDeLagunasDeEstabilizacion.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

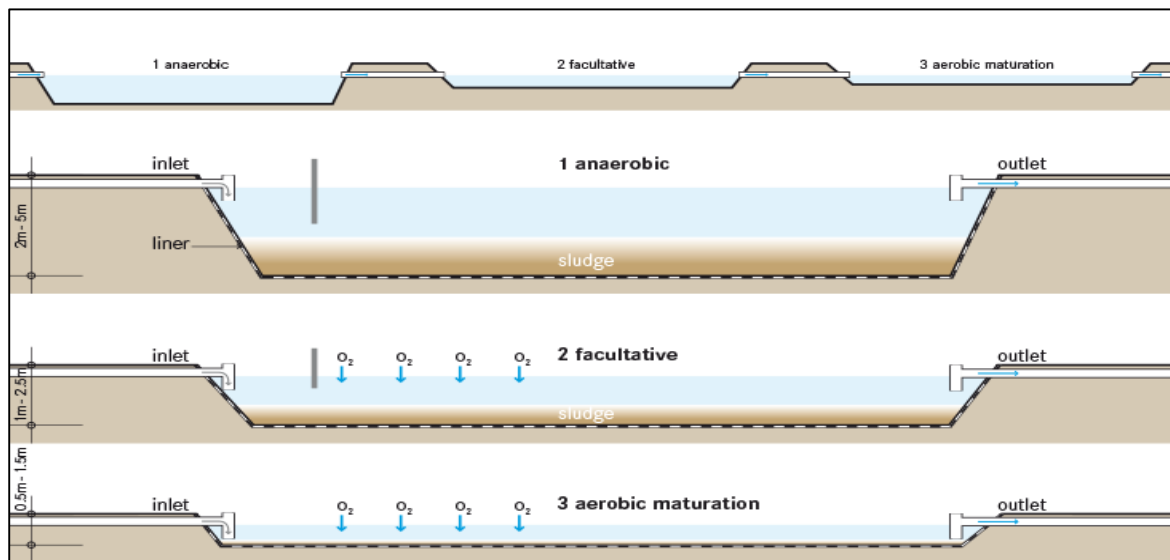
tipos de flujos y de esto también dependerá el grado de remoción de carga orgánica en el tratamiento.

El primero es el flujo de mezcla completa ideal está caracterizado porque la masa de agua que entra al sistema se dispersa instantáneamente, haciendo que las características del agua sean las mismas en cualquier punto, es decir que las tasas de reacción son constantes en el reactor y la demanda de oxígeno es idéntica en cualquier punto de muestreo, así mismo ocurre con la tasa de remoción⁶⁴.

El segundo es el flujo de tipo pistón, este es menos favorable para las lagunas pero es el que más se presenta en estos tratamientos, consiste en que el agua que ingresa a la laguna es descargada en el mismo orden en que ésta ingresó, el agua realiza el recorrido sin recorrer todos los espacios de la laguna, presentándose zonas muertas donde se limita la remoción de carga orgánica⁶⁵.

Y por último se presenta el flujo de tipo arbitrario es un régimen de transición entre el flujo de pistón y el de mezcla completa, definido por las características geométricas de la laguna y otros factores que inciden como las condiciones ambientales propias del entorno donde se encuentra. Todos estos factores interactúan simultáneamente, marcando una dispersión característica para cada laguna⁶⁶.

Figura 6: Esquema de los tipos de lagunas de estabilización.



Fuente: Tilley et al 2008 ⁶⁷.

⁶⁴ CRUZ et al. Metodología Para la Selección del Régimen de Flujo en Lagunas de Estabilización, 2000. Revista Ingeniería e Investigación No. 46 p.1

⁶⁵ Ibid., p. 1

⁶⁶ Ibid., p. 2

⁶⁷ TILLEY E. et. al. Compendio de sistemas y tecnología de saneamiento, Alianza por el agua, ISBN 978-3-906484-48-8 2008 [En línea]

En la Figura 6 se muestran las diferencias en la profundidad de los tres tipos de lagunas, las lagunas anaerobias son las más profundas y las lagunas de maduración requieren menor profundidad (0.5-1.5), cada laguna tiene requerimientos diferentes en los tratamientos y sus condiciones son diferentes. Las lagunas facultativas y las de maduración requieren oxígeno y la acción solar promueve la remoción de la carga orgánica, aunque en el proceso puede generar olores y el agua se puede perder por evaporación, estas lagunas depuran más rápido y no se genera gas metano.

6.1.4 Parámetros de la calidad de agua residual según la OMS

Guías con los parámetros establecidos para aguas tratadas en el reúso y sus requerimientos de tratamiento:

Tabla 2: Parámetros físicos-químicos y microbiológicos para los tres tipos de reúso agrícola.

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

Fuente: Autores 2016, Adaptada de FAO 1996 ⁶⁸.

Como se observa en la tabla, los cultivos que se consumen frescos pero que no se comercializan necesitan de una mayor rigurosidad en la calidad del agua de riego, así como en sus procesos de tratamiento y depuración porque hay un mayor riesgo de contaminación por patógenos, lo que conlleva a problemas en la salud. Sin embargo

http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TILLEY%20et%20al%202010%20Compendio%20de%20Sistemas%20y%20Tecnologias%20de%20Saneamiento%20SPANISH.pdf [Citado el 18 de abril de 2016]

⁶⁸ LEON, Parámetros de calidad para el uso de aguas residuales. guías de calidad de efluentes para la protección de la salud. CEPIS 1995, p. 5 [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/aya2/tema04.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

las calidades del agua residual tratada varían según la normatividad de cada país y es difusa la aplicación de estos parámetros.

En la Tabla 3 se muestran las directrices de la OMS sobre calidad parasitológica y microbiológica de aguas residuales para uso en agricultura, según la clasificación del cultivo.

Tabla 3: Calidad parasitológica y microbiológica de agua residual para uso en agricultura, según la categoría del cultivo.

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

Fuente: Propia, Adaptada de FAO 1996⁶⁹.

Tener en cuenta la calidad microbiológica es fundamental para el uso de agua residual en el riego, y es claramente establecido que los cultivos susceptibles a la contaminación por bacterias son las hortalizas y demás frutas que se consuman frescas. Los parámetros propuestos por la OMS son muy importantes como guía para los países que implementen estas prácticas a gran escala.

6.1.4.1 Normativa en Colombia para reúso de agua residual

En Colombia la normativa que ha regido el uso de agua es el Decreto 3930 de 2010, pero este artículo no cuenta con parámetros claros acerca de la calidad de agua para riego, como antecedente normativo en Colombia se tiene el Decreto 1594 de 1984, donde el Artículo 40 básicamente, se refiere a los criterios admisibles que debe tener

⁶⁹ León, óp. cit, p. 5

el agua para uso agrícola y a la cantidad de coliformes fecales para cualquier cultivo. Para reusó de aguas residuales no se encuentran requerimientos específicos.

Tabla 4: Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola son los siguientes.

Referencia	Expresado como	Valor
Aluminio	Al	5.0
Arsénico	As	0.1
Berilio	Be	0.1
Cadmio	Cd	0.01
Cinc	Zn	2.0
Cobalto	Co	0.05
Cobre	Cu	0.2
Cromo	Cr+ ⁶	0.1
Flúor	F	1.0
Hierro	Fe	5.0
Litio	Li	2.5
Manganeso	Mn	0.2
Molibdeno	Mo	0.01
Níquel	Ni	0.2
pH	Unidades	4.5 - 9.0 unidades.
Plomo	Pb	5.0
Selenio	Se	0.02
Vanadio	V	0.1

Fuente: Decreto 1594 de 1984.

El NMP de coliformes totales no deberá exceder de 5.000 cuando se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto; y El NMP de coliformes fecales no deberá exceder de 1.000 cuando se use el recurso para el mismo fin del literal anterior⁷⁰.

Actualmente en el Decreto 1207 de 2014, por el cual se establecen las disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas, presenta los parámetros físico químicos y microbiológicos para el agua residual tratada que sea utilizada para riego de: Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal cultivos no alimenticios para humanos o animales, cultivos de fibras celulósicas y derivados, cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes, cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles, cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos, áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento y jardines en áreas no domiciliarias.⁷¹ A continuación se muestra los parámetros físicos químicos y microbiológicos para el uso de agua residual tratada en riego:

⁷⁰ DECRETO 1594 de 1984. Presidencia de la Republica, Por la cual se reglamenta los usos del agua y residuos líquidos. Ministerio de Agricultura y Ministerio de salud [En línea] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisiur/normas/Norma1.jsp?i=18617> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁷¹ RESOLUCIÓN 1207 de 2014 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas [En línea] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisiur/normas/Norma1.jsp?i=59135> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

Tabla 5: Parámetros físicos químicos y microbiológicos para el uso de agua residual tratada en riego.

Variable	Unidad de Medida	Valor Limite Máximo Permissible
FISICOS		
pH	Unidades de pH	6,0 – 9,0
Conductividad	µS/cm	1.500,0
MICROBIOLOGICOS		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0*E(+5)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1,0*E(2)
Helmintos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1,0
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100 mL	1,0
QUIMICOS		
Fenoles Totales	mg/L	1,5
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0
Iones		
Cianuro Libre	mg CN ⁻ /L	0,2
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	300,0
Fluoruros	mg F ⁻ /L	1,0
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	500,0
Metales		
Aluminio	mg Al/L	5,0
Berilio	mg Be/L	0,1
Cadmio	mg Cd/L	0,01
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobalto	mg Co/L	0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0
Cromo	mg Cr/L	0,1
Hierro	mg Fe/L	5,0
Mercurio	mg Hg/L	0,002
Litio	mg Li/L	2,5
Manganeso	mg Mn/L	0,2
Molibdeno	mg Mo/L	0,07
Niquel	mg Ni/L	0,2
Plomo	mg Pb/L	5,0
Sodio	mg Na/L	200,0
Vanadio	mg V/L	0,1
Metaloides		
Arsénico	mg As/L	0,1
Boro	mg B/L	0,4
No metales		
Selenio	mg Se/L	0,02
Otros parámetros		
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl ₂ /L	Menor a 1,0
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N)	mg/L	5,0

Fuente: Resolución 1207 de 2014⁷².

⁷² RESOLUCIÓN 1207 de 2014 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, [En línea] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=59135> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

Aunque se cuenten con parámetros para algunos cultivos (Tabla 5) la normativa no es clara en el uso de agua residual para cultivos comestibles, los parámetros mostrados son más permisibles en comparación a los dados por la FAO, debido a que son para cultivos no consumibles por tanto hay falencias en la aplicación.

6.1.5 Parámetros establecidos para la investigación

Los análisis de calidad de agua permiten realizar una valoración físico-química y microbiológica del agua. En este trabajo se valoraran parámetros determinados que fueron escogidos debido a su importancia en la determinación de la calidad del agua.

Cuadro 3: Parámetros de calidad de agua para la investigación.

Parámetros	Descripción	Expresada en	Método de medición Tomada de (Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.)
Solidos Totales	Estima la cantidad de materia disuelta y en suspensión que lleva una muestra de agua.	Peso de residuo seco : mg/L	Método gravimétrico Secados a temperatura 103°C – 105°C
Solidos Suspendidos Totales	Material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual	mg/L	Método gravimétrico Secados a temperatura 103°C – 105°C
Solidos Disueltos Totales	Son todos los residuos sólidos que se obtienen por evaporación directa de la muestra de agua y posterior secado a temperatura de 103-105° incluye el residuo filtrable y no filtrable que corresponde a los sólidos disueltos y suspendidos.	mg/L	Secado a 180°
Nitrógeno Total	El nitrógeno total es una medida de todas las varias formas de nitrógeno que se encuentran en una muestra de agua	mg/L	Macro-Kjeldahl y Destilación
Fosforo Total	El análisis de fósforo envuelve dos pasos generales: 1-conversión de la forma de fósforo total a ortofosfato, y 2- determinación colorimétrica del ortofosfato disuelto	mg de PO ₄ /L	Método del ácido ascórbico
Coliformes Totales	Bacterias Gram- negativas, no esporo formadoras, tienen la capacidad de crecer en ambientes aeróbicos facultativos y anaeróbicos en presencia de sales biliares,	UFC/ml	Filtración por Membrana SM 9222 B y Sustrato Enzimático SM 9223 B

	que a temperatura especificada de 35°C +/- 2°C causan fermentación de lactosa con producción de gas.		
Coliformes Fecales	Bacterias Gram-negativas capaces de fermentar la lactosa con producción de gas a las 48 h. de incubación a 44.5 ± 0.1°C. Este grupo no incluye una especie determinada, sin embargo la más prominente es <i>Escherichia coli</i> .	UFC/ml	Filtración por Membrana SM 9222 D y Sustrato Enzimático SM 9223 B
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	Es la medida de oxígeno equivalente a la materia orgánica que es susceptible a ser oxidada por un oxidante químico fuerte, en condiciones específicas de temperatura y tiempo	mgO ₂ /l	Reflujo cerrado y Volumetría
DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	La cantidad de oxígeno disuelto consumido por un cierto volumen de una muestra de agua, para los procesos de oxidación bioquímica durante un período de cinco días a 20°C	Miligramos por litro de oxígeno consumido (mg/L)	Incubación a 5 días y Electrodo de Membrana,

Fuente: IDEAM 2004 ⁷³ 2007⁷⁴.

Para determinar la calidad del agua en general se toman como referencia los parámetros establecidos por la normativa, aunque depende de las necesidades de las personas y el reusó que se le quiera dar al agua residual, la restricción en los parámetros puede modificarse. Este trabajo se enfoca en la inactivación de las coliformes totales y fecales por tanto los parámetros establecidos en la Cuadro 3 satisfacen los requerimientos para analizar el agua y verificar que la carga orgánica sea removida y no sea medio para el crecimiento de patógenos.

⁷³ IDEAM 2004 Guía para el Monitoreo y Seguimiento del Agua [En línea] http://www.fing.edu.uy/imfia/cursos/hidrometria/material/Guia_de_Monitoreo.pdf [Citado el 10 de Octubre de 2015]

⁷⁴ IDEAM 2007 Determinación de *E. Colli* y Coliformes Totales en Agua [En línea] <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Coliformes+totales+y+E.+coli+en+Agua+Filtraci%C3%B3n+por+Membrana.pdf/5414795c-370e-48ef-9818-ec54a0f01174> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

6.2 MARCO LEGAL

Norma	Año	Artículos aplicables	Descripción
Constitución Nacional de la Republica de Colombia ⁷⁵	1991	Título II Capítulo 3	Establece el derecho colectivo a un ambiente sano, y promueve el cuidado, la protección y la conservación del medio ambiente.
Ley 99 ⁷⁶	1993	Artículo 31 Artículo 44 Artículo 66	Lineamientos para el uso y protección de recurso hídrico.
Decreto 1594 ⁷⁷	1984	Artículo 40 Artículo 29 Artículo 32 Artículo 63	Parámetros y criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola.
Decreto 3930 ⁷⁸	2010	Artículo 5 Artículo 7 Artículo 9 Artículo 13	Especificaciones para los diferentes usos del agua.
Resolución 1207 ⁷⁹	2014	Artículo 6 Artículo 7	Parámetros físico-químicos y microbiológicos para diferentes usos de agua residual tratada.
RAS (Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico) ⁸⁰	2000	Título E	Establece los parámetros mínimos de la calidad del agua residual.
CONPES 3177 ⁸¹	2002	VI Estrategias de gestión de agua residual	Fomento de nuevas alternativas de manejo y tratamiento de aguas residuales.

⁷⁵ Constitución política de Colombia. 1991. Título 2. Capítulo 3. [en línea]

http://www.unesco.org/culture/natlaws/media/pdf/colombia/colombia_constitucion_politica_1991_spa_orof.pdf [Citado 28 de octubre de 2015]

⁷⁶ Ley 99. 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Artículos 31, 44 y 67. [En línea]

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=297> [Citado 28 de octubre de 2015]

⁷⁷ Decreto 1594. 1984. por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Artículos 40, 29, 32 y 63. [En línea] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617> [Citado 28 de octubre de 2015]

⁷⁸ Decreto 3930. 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Artículos 5, 7,9 y 13.

[En línea] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620> [Citado 28 de octubre de 2015]

⁷⁹ Decreto 1207. 2014. Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Artículos 6 y 7. [En línea] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=59135> [Citado 28 de octubre de 2015]

⁸⁰ Reglamento técnico de saneamiento y agua potable RAS. 2000. Título E, sección II. [En línea]

http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/7. Tratamiento_de_aguas_residuales.pdf [Citado 28 de octubre de 2015]

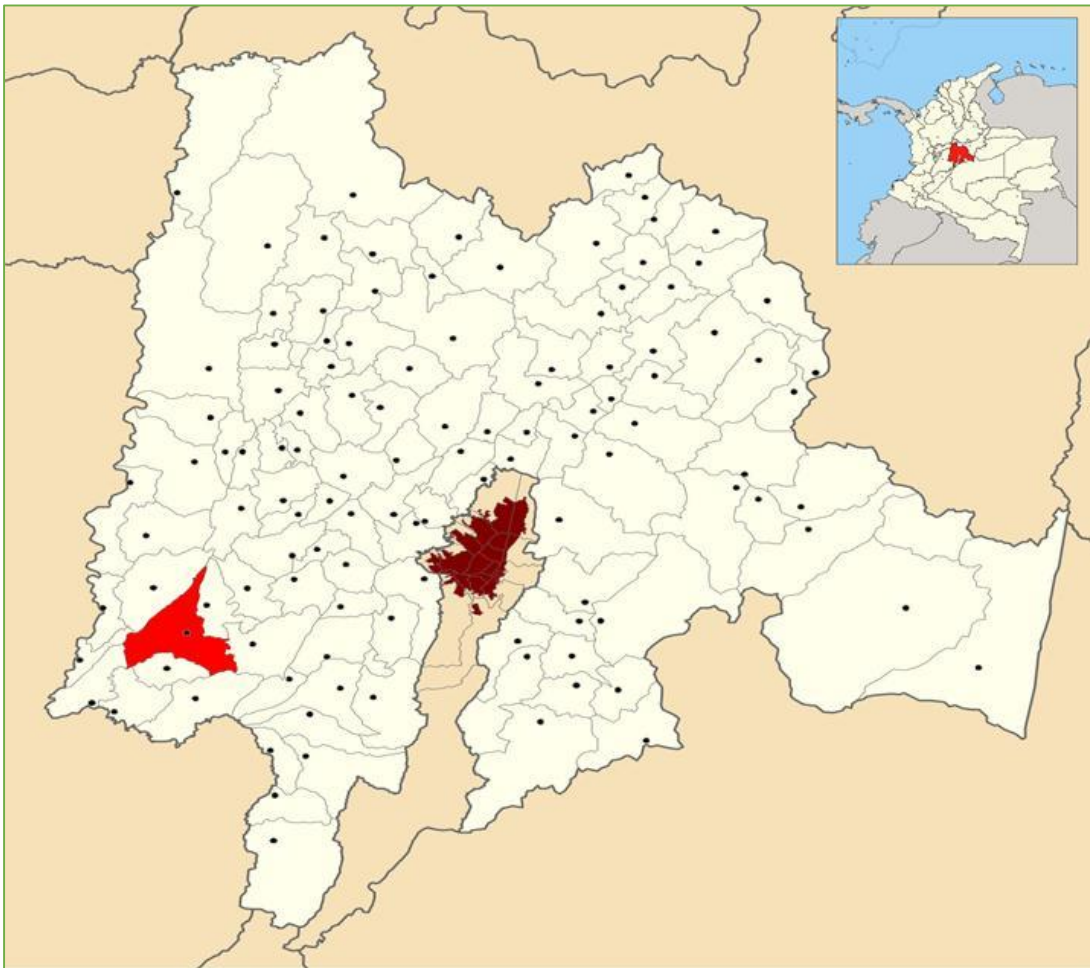
⁸¹ CONPES 3177. 2002. Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del plan nacional de manejo de aguas residuales. Sección IV [En línea] <http://www.minvivienda.gov.co/conpesagua/3177%20-%202002.pdf> [Citado 28 de octubre de 2015]

7. DISEÑO METODOLÓGICO

7.1 Ubicación y Características agro climatológicas:

El municipio de Tocaima se encuentra ubicado en el suroccidente del departamento de Cundinamarca.

Figura 7: Ubicación geográfica del municipio de Tocaima en el Departamento de Cundinamarca.



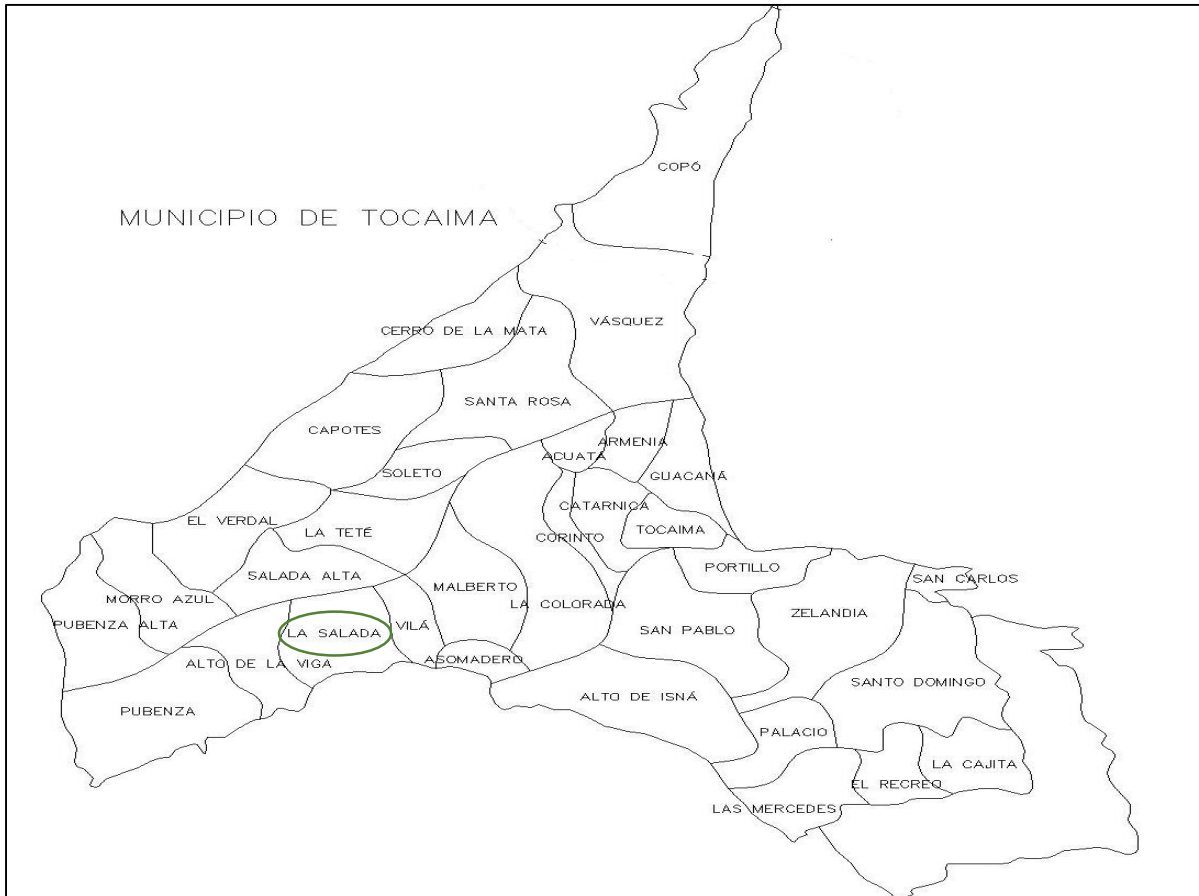
Fuente: Alcaldía de Tocaima⁸².

El municipio coloreado en rojo corresponde a Tocaima, perteneciente a la cuenca alta del Río Magdalena.

⁸² Alcaldía de Tocaima [En línea]
<http://www.tocaima-cundinamarca.gov.co/index.shtml> [Citado 28 de octubre de 2015]

Municipio de Tocaima

Figura 8: Ubicación geográfica de la vereda la Salada en el municipio de Tocaima.



Fuente: Alcaldía de Tocaima⁸³.

⁸³ Alcaldía de Tocaima <http://www.tocaima-cundinamarca.gov.co/index.shtml> [Citado 28 de octubre de 2015]

Figura 9: Ubicación de la finca El Jardín ubicada en el km 21 vía Girardot-Tocaima.



Fuente: Google earth⁸⁴.

 Finca el Jardín

El municipio de Tocaima forma parte de la Provincia del Alto Magdalena, en el suroeste del Departamento de Cundinamarca. Se encuentra situada dentro de la zona andina al margen izquierdo de la cordillera oriental y pertenece a la subregión natural central del valle cálido del alto Magdalena. Tiene una extensión total de 246 Km² de los cuales 2,8 Km² y 243 Km² corresponden al área urbana y rural respectivamente, ubicándose en diferentes altitudes como 287 m.s.n.m en el centro poblado de Pubenza, 400 m.s.n.m en la cabecera municipal y 1568 m.s.n.m en la vereda Copo al norte del municipio.

Tocaima limita con los municipios de: Girardot por el occidente, Nariño y Jerusalén por el noroeste, Apulo por el oriente y norte, Viotá por el oriente, Nilo y Agua de Dios por el sur⁸⁵.

Tocaima tiene dos pisos térmicos; el templado que representa el 6.5% del área y el cálido con 93,5% de la misma. La temperatura promedio es de 28° C y una precipitación promedio de 1051,1 mm anuales, su patrón de lluvias es bimodal que comprende dos

⁸⁴ <https://www.google.es/intl/es/earth/>

⁸⁵ Alcaldía de Tocaima [En línea]

<http://tocaima-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/63393364313232396364633962663637/plan-de-accion-cidea.pdf> [Citado 28 de octubre de 2015]

periodos de lluvias: Octubre-Noviembre y Abril-Mayo como temporada lluviosa, y dos periodos que son Diciembre-Enero y Julio- Agosto. Respecto al balance hídrico el municipio se sitúa en zona deficitaria en la mayor parte del año, alcanzando déficit hídrico de 620 mm anual y en temporada de lluvia un excedente de 47 mm⁸⁶.

Las veredas que pertenecen a Tocaima son las siguientes: Pubenza, Pubenza Alta, Morro Azul, Alto de la Viga, Salada, Salada Alta, El Verdal, Capotes, La Tete, Malberto, Vila, El Asomadero, Cerro de la Mata, Santa Rosa, La Colorada, Alto de Isná, Acuata; Corinto, San Pablo, La Gloria, Palacios, Las Mercedes, Copo, Vásquez, Armenia, Catarnica, Guacana, Portillo, Zelandia, Santo domingo, El Recreo, La Cajita, San Carlos, Cachimbula, Alto de Isná Bajo, Pantanos, Camellon del Río. Los centros poblados que en los artículos 84, 85, 86 y 87 del EOT de Tocaima se establecen, son los siguientes: La Colorada, Pubenza, La Salada y San Carlos⁸⁷.

Respecto a los factores agroclimatológicos, el municipio de Tocaima presenta valores anuales de evaporación de 1200 mm, evapotranspiración de 1550 mm, brillo solar entre 1700-2100 horas/año y una humedad relativa entre el 70 y 80%. El municipio posee vocación agrícola, y debido a su variación altitudinal se encuentran cultivos de diversa índole como frutales, tubérculos, pastos y algunas hortalizas; estas últimas presentan un buen potencial de producción debido a que en las zonas cuyo terreno es plano o ligeramente plano, se pueden desarrollar sistemas agrícolas hortícolas con infraestructura de riego⁸⁸.

La zona de vida que corresponde a este municipio es el Bosque seco Tropical (Bs-T), cuyos suelos en su mayoría presentan pendientes planas y ligeramente planas (3% y 7%) lo que corresponde a el 60% del territorio, aunque en los sectores que bordean el municipio se presentan pendientes quebradas del 12% a 25% hasta escarpadas y muy escarpadas de 45% a 50% o más, lo que corresponde a las cuchillas, cerros y altos que bordean la cabecera municipal⁸⁹.

No obstante hacia el norte, en el cerro El Copó, se encuentra una porción pequeña de Bosque húmedo Pre montano (Bh-Pm), lugar que colinda con el municipio de Apulo y que representa un porcentaje pequeño del área total de Tocaima⁹⁰.

En materia de suelos, esta región posee diversas clasificaciones, obedeciendo también al relieve y material geológico establecido allí. En los sectores de relieve ondulado y colinas de clima seco se encuentra suelos según la clasificación U.S.D.A: Typic Ustropept, que se caracterizan por tener buen drenaje, profundidad media a alta, textura de moderadamente fina a moderadamente gruesa, acidez y fertilidad natural media.

⁸⁶ Alcaldía de Tocaima. Información General [En línea]

http://tocaima-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml [Citado 28 de octubre de 2015]

⁸⁷ EOT del Municipio de Tocaima ACUERDO No. 024-2008

⁸⁸ Ministerio de Agricultura 2006 Desarrollo de la Fruticultura en Cundinamarca [En línea]

http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_106_Plan%20Nal%20fruc-cundinamarca.pdf

⁸⁹ CAR 2012 Plan de Acción de Educación Ambiental del CIDEA [En línea]

<http://tocaima-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/63393364313232396364633962663637/plan-de-accion-cidea.pdf> [Citado 28 de octubre de 2015]

⁹⁰ ibíd. pág. 57

En los terrenos quebrados de cordillera se encuentran suelos Typic Haplustoll cuyas características son de textura franco a fino, drenaje poco desarrollado, profundidad baja a media, nivel alto de fertilidad y afectado por sales.

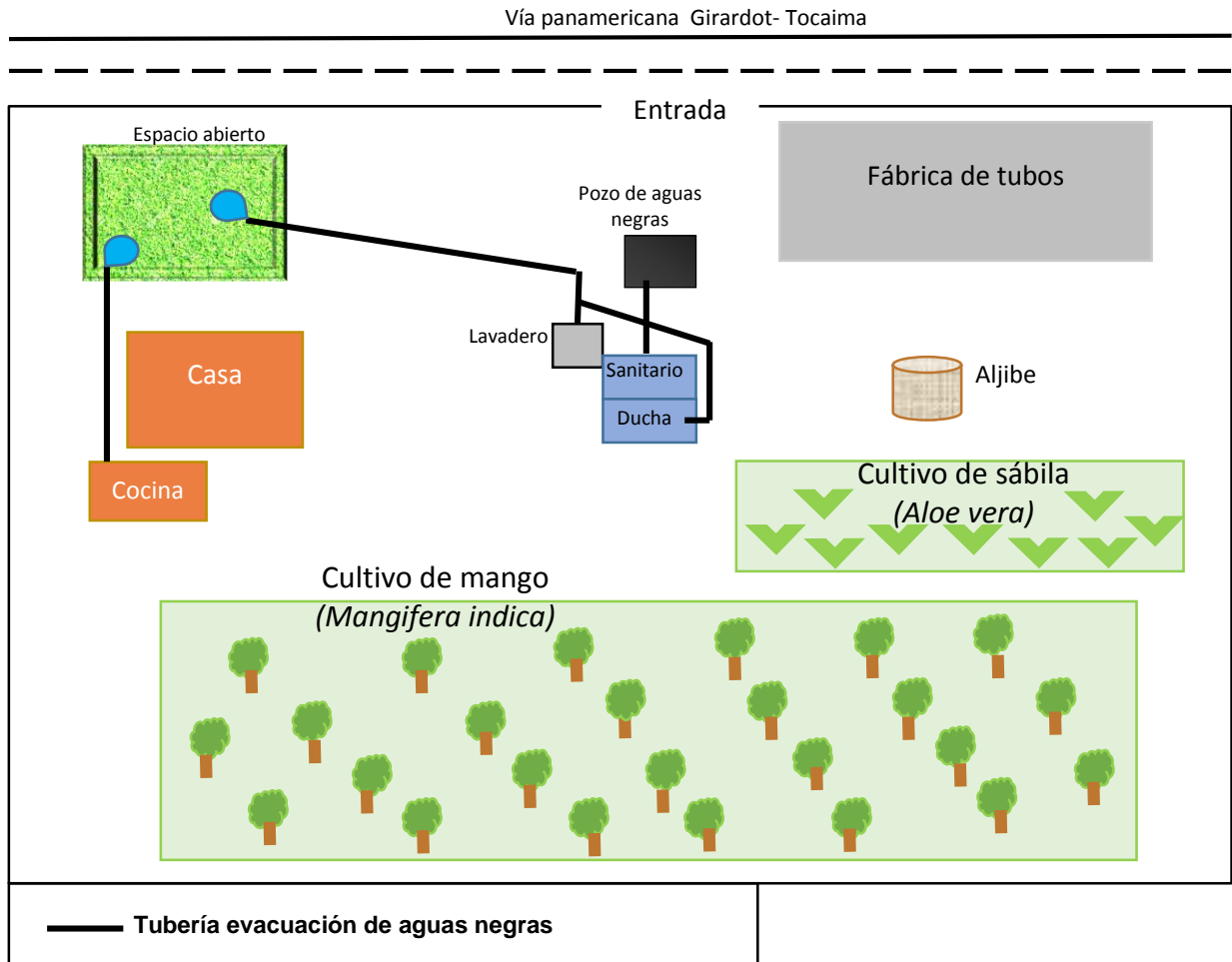
En pendientes más pronunciadas y relieve escarpado se encuentra el suelo Lithic Ustorthent caracterizado por tener inclusiones de afloramientos rocosos, con material sedimentario de areniscas y arcillolitas con un drenaje excesivo. Otros suelos encontrados en el municipio son Vestle Ustropept, Lithie Haplustoll, Entie Haplustoll y Lithic Ustropept⁹¹.

Este trabajo se realizó en la Finca El Jardín, ubicada en la Vereda La Salada, cuyas coordenadas geográficas son 4°25'23.52"N - 74°42'7.41"O. La finca se encuentra al borde de la vía Girardot-Tocaima en el Km 21, tiene un área de 1.8 hectáreas. El sistema productivo está caracterizado por la presencia de cultivo de sábila (*Aloe vera*) y de mango (*Mangifera indica*), éste no ha dado cosecha puesto que se encuentra en crecimiento. Además cuenta con un taller para la fabricación de tubos de concreto como insumos en la construcción de aljibes, la cual es la actividad principal del propietario de la finca. Los suelos son arcillosos con déficit en Nitrógeno y en algunos microelementos (Ver Anexo 7).

⁹¹EOT Municipio de Obando, Tipos de Suelos

[http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/eot_componente_gral_tabla_4_obando_\(2_pag_13_kb\).pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/eot_componente_gral_tabla_4_obando_(2_pag_13_kb).pdf) [Citado 28 de octubre de 2015]

Figura 10: Esquema de la finca El Jardín.



Fuente: Autores, 2016.

El sistema de evacuación de aguas residuales de la finca se compone por tres tuberías como se observa en la Figura 10: la primera conduce el agua gris proveniente de las actividades de lavado de ropa y ducha a un espacio abierto, la segunda conduce el agua gris proveniente de la cocina al mismo lugar, y por último una tubería que conduce las aguas negras provenientes del sanitario a el pozo séptico.

7.2 METODOLOGÍA

La finca cuenta con una conexión de manguera negra de polietileno de baja densidad de 1 pulgada de diámetro que conduce las aguas grises (ducha y lavadero) a un espacio abierto de la finca, un tubo gres de 4 pulgadas que conduce las aguas negras (sanitario) hacia un pozo séptico construido artesanalmente con unas medidas de 2.5 m de ancho x 2.5 m de alto y 2,5 m de profundidad, y una tubería de 1 pulgada que conduce las aguas provenientes de la cocina al suelo. El primer paso consistió en aforar los caudales de todas las tuberías de conducción de agua residual empezando por la tubería de agua gris teniendo en cuenta las actividades de lavado de ropa y ducha regular con un recipiente de volumen conocido. Para esto se tomó un volumen de 10 Litros, determinando el caudal durante 8 días con la siguiente fórmula:

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Volumen del recipiente en Litros}}{\text{Tiempo de llenado en minutos}}$$

La tubería de aguas negras se aforó mediante la determinación del volumen en varias descargas del inodoro durante los mismos 8 días de aforo de la tubería de agua gris.

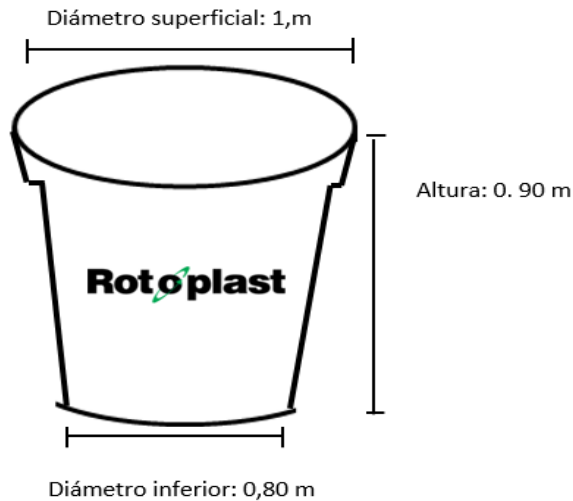
Tras aforar los caudales de la tubería se dirigió la conexión de agua gris hacia un nuevo pozo de almacenamiento cuyas medidas se determinaron al conocer los aforos iniciales de esta tubería y la generación semanal de agua gris. Luego de modificar la tubería se realizaron nuevos aforos del caudal, las aguas negras se dejaron fluir al pozo séptico existente por lo que no se realizaron modificaciones posteriores a su aforo.

Adjunto a la etapa anterior se adquirieron los equipos, insumos y materiales necesarios para la implementación de los tratamientos de filtración lenta en arena y de laguna de maduración, los cuales se especifican a continuación:

7.2.1 Montaje del Filtro lento en arena (FLA)

Para el ensamblado del filtro lento en arena se adquirió un tanque de polietileno de alta densidad marca Rotoplast con un volumen de 500 L. Las medidas se consignan en la siguiente figura:

Figura 11: Medidas del tanque para el montaje del FLA.



Fuente: Autores, 2016.

Para la elaboración del falso fondo del filtro se utilizó un anejo de acero galvanizado con agujeros de 8mm x 8mm el cual se introdujo previamente recortado y ajustado al diámetro inferior del tanque (Figura 12), siendo soportado por 5 ladrillos de tipo común para impedir el taponamiento de la salida del agua. Este falso fondo proporcionó un espacio vacío de 10 cm de altura entre la capa de gravilla y el fondo del tanque.

Figura 12: Montaje de falso fondo del FLA.



Fuente: Autores, 2016.

Se adquirió una llave de PVC de 1 pulgada para la salida del agua tratada del filtro y dos tapones del mismo material de 1 y de ½ pulgada para evitar el rebose en la parte superior del tanque.

Se realizaron demarcaciones cada 10 cm al interior del tanque como guía para agregar las capas del lecho. Para el establecimiento del lecho filtrante se escogieron 3 capas de material: gravilla, arena gruesa gris y arena fina. Las especificaciones del material filtrante se consignan en la siguiente tabla:

Tabla 6: Especificaciones del lecho filtrante.

Material	Coefficiente de uniformidad (Cu) ideal	Diámetro	Diámetro efectivo	Altura de la capa en el filtro	Cantidad en Kg	Valor (\$)	Lugar de compra
Gravilla	<1,6	½ pulgada	No aplica	10 Cm	30	6.000	Ferretería local
Arena gruesa (gris)		0,6 mm	0,35	10 Cm	120	21.000	Ferretería local
Arena fina		0,2 mm	0,15	20 Cm	200	30.000	Ferretería local

Fuente: Autores, 2016.

Seguido a esto, se lavó la gravilla y la arena gruesa con agua para remover el barro y demás impurezas que estas traen desde el distribuidor. Además el lavado es importante para el buen funcionamiento del material filtrante, para evitar la colmatación temprana y las pérdidas de carga altas en un corto tiempo de uso. También se tamizó la arena fina para garantizar la uniformidad de sus granos.

Las consideraciones básicas de diseño hidráulico del filtro se establecieron por revisión bibliográfica^{92,93,94}. Con base en estos parámetros, se ajustó el funcionamiento del filtro, su carga hidráulica, velocidad de filtración, área superficial y caudal de salida. A continuación se especifica cada una:

- Volumen aplicado de agua residual: 260 L/día
- Carga hidráulica: 0,1 m³/m² / h
- Velocidad de filtración: 0,03 m/h
- Caudal del efluente: se aforó en diferentes tiempos con un volumen conocido de 500mL
- Área superficial: 2,6 m²

⁹² MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS) 2000, Título C sección 2, p. 61-70

⁹³ TORRES y VILLANUEVA. Universidad piloto de Colombia, 2014. El filtro de arena lento: Manual para el armado, instalación y monitoreo.

⁹⁴ AGUIRRE Andrea, 2012. Valoración de unidades de filtración lenta en arena como alternativa para la remoción de contaminación bacteriológica en aguas residuales de efluentes secundarios anaerobios. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Pereira.

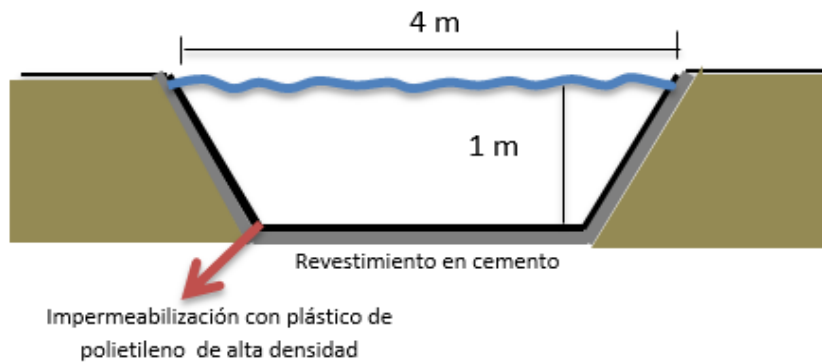
- Diámetro de superficie del lecho: 0,86 m

El filtro se ubicó a 3,56 m de distancia de la laguna de maduración.

7.2.2 Acondicionamiento de la laguna de maduración

En primera medida se realizó la limpieza del terreno circundante de la laguna existente, se hizo trabajo de rastrillado, desyerbado y barrido. Además, se retiraron escombros, piedras grandes, y ramas espinosas. Para la impermeabilización de esta laguna se emplearon dos capas de plástico negro de polietileno calibre 400 de 27m² y 20 m² como recubrimiento inferior y como capa superficial respectivamente.

Figura 13: Medidas de la laguna de maduración original.



Fuente: Autores, 2016.

Posteriormente la laguna se dividió en dos, de esta manera se contó con dos lagunas cada una con un volumen de 2m³.

7.2.3 Bombeo a los tratamientos

Para el bombeo del agua residual de la finca se utilizaron dos motobombas eléctricas; la primera motobomba marca Toolcraft de un caballo de fuerza que impulsó el agua contenida en el pozo séptico. Por otra parte la segunda motobomba con la misma potencia marca Hamwo (Figura 14) extrajo el agua contenida en el pozo de almacenamiento de agua gris. La manguera de impulsión utilizada fue de 1 pulgada de polietileno de baja densidad, la cual dirigió el agua residual hacia las unidades de tratamiento.

Figura 14: Motobomba para el pozo de agua gris.



Fuente: Autores, 2016.

7.2.3.1 Bombeo a la laguna

Inicialmente se bombeó agua desde el pozo séptico hacia la laguna de maduración introduciendo el tubo de succión de la motobomba en el ducto de escape de gases del pozo. Se manejó un caudal constante de 0,4 L/s durante 50 minutos contribuyendo el 50% del volumen total del agua residual a tratar por parte de la laguna. En segundo lugar se bombeó agua gris desde el pozo de almacenamiento ubicando la motobomba en un costado de éste, generando un caudal constante de 0,37 L/s durante 40 minutos contribuyendo con el otro 50% del volumen total. En total, se llenó la laguna de maduración con 2 metros cúbicos de agua residual, distribuidos en 1 m³ de agua negra y 1m³ de agua gris.

El tiempo de retención hidráulico establecido para la laguna de maduración fue de 18 días.

7.2.3.2 Bombeo al filtro

De la misma forma, se bombeó agua residual tanto del pozo séptico como el de agua gris estableciendo un volumen en el filtro de 50 litros, distribuidos en porcentajes de mezcla iguales de agua negra y gris. Para el inicio del proceso de maduración del filtro y promover la formación de la película biológica o schmutzdecke, fue necesario la aplicación intermitente de agua residual para lograr un óptimo crecimiento de la población microbiana y mantener mojado el lecho filtrante. La maduración del filtro tomó 16 días y el agua filtrada durante este proceso no fue tomada en cuenta para ninguna actividad o análisis, puesto que su calidad aun no era óptima. La duración de cada ciclo de tratamiento fue de 3 días.

La medición de caudales se realizó por un medidor de flujo (Figura 15) instalado en la manguera de bombeo.

Figura 15: Medidor de flujo.



Fuente: Autores, 2016.

El porcentaje de mezcla 50/50 de agua gris y agua negra para el desarrollo de las unidades de tratamiento fue escogido para mantener equilibrados los aportes de materia orgánica por parte del agua negra y el aporte de nutrientes provenientes del agua gris, además esto garantiza que ambos sistemas cuenten con las mismas condiciones para que los resultados de los análisis de las unidades de tratamiento puedan ser comparados entre sí. En la bibliografía referenciada no se identificaron tratamientos donde se especifique una concentración recomendada de aguas negras y aguas grises, por tanto este porcentaje fue establecido por criterio propio.

7.2.4 Muestreo

Primeramente se tomaron muestras del agua residual para caracterizar su contenido inicial de los siguientes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos teniendo como referencia el decreto 1594 de 1984 y directrices de la FAO y OMS:

- Sólidos Totales
- Sólidos Suspendidos
- Sólidos Disueltos
- Nitrógeno Total
- Fósforo Total
- Coliformes Totales
- Coliformes Fecales
- DQO (Demanda Química de Oxígeno)
- DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)

Luego se tomaron muestras del agua tratada por la laguna tras 18 días de tratamiento y finalmente se tomaron muestras del agua tratada por el filtro teniendo en cuenta el previo proceso de maduración del mismo. El muestreo se realizó teniendo en cuenta

las consideraciones técnicas de la guía Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 2012⁹⁵.

En total se realizaron tres muestreos simples (Ver Anexo 2) analizando los parámetros ya mencionadas. Las muestras fueron tomadas en frascos de vidrio esterilizados en autoclave a 120 C° y a 15 Psi usándose en total 12 frascos de 500 ml y 3 frascos de 250 ml (Figura 16). En la Tabla 7 se especifica los preservantes agregados a las muestras, refrigeración y volúmenes para su posterior análisis.

Figura 16: Frascos para muestreo.



Fuente: Autores, 2016.

Tabla 7: Especificaciones de muestreo.

Parámetro	Volumen requerido	Preservante	Refrigeración	Especificaciones
Demanda Química de Oxígeno y Fosforo Total	500 mL	Ácido sulfúrico	4°C	Reducir de pH a 2
Demanda Bioquímica de oxígeno	500 mL	Ninguno	4°C	Verificar que el pH este entre 7 y 8. En caso que sea menor o mayor a este rango adicionar

⁹⁵ Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 22 ND Edición 2012 ISBN 978-087553-013-0. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation sección 9-10

				ácido sulfúrico o hidróxido de sodio según corresponda
Sólidos totales, disueltos y suspendidos	250 mL	Ninguno	4°C	Ninguna
Nitrógeno orgánico total	500 mL	Ácido sulfúrico	4°C	Reducir el pH a 2
Coliformes totales y fecales	500 mL	Tiosulfato de sodio pentahidratado al 10%	4°C	Aplicar 0,4 ml a cada envase antes de su autoclavado (Imagen 19)

Fuente: Autores 2016, Adaptada de Standard Methods 2012⁹⁶.

Para cumplir las especificaciones de conservación y preservación de las muestras, se utilizó un pH metro marca Hanna previamente calibrado (Figura 17) con soluciones tampón de pH 7 y 4 marca Merck, agua destilada comercial, solución de Tiosulfato de sodio (al 10%) pentahidratado, ácido sulfúrico concentrado (98%), Hidróxido de Sodio, y nevera de icopor con bolsas de hielo triturado.

Figura 17: Calibración de pH Metro.



Fuente: Autores, 2016.

⁹⁶ Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 22 ND Edición 2012 ISBN 978-087553-013-0. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation sección 9-10

El muestreo del agua residual cruda se realizó aplicando 20 litros de agua negra y 20 litros de agua gris en un recipiente plástico de 60 litros que garantizó una profundidad necesaria para realizar el muestreo adecuadamente.

El análisis de las muestras se realizó en el laboratorio de aguas de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) sede Tibaitatá en Mosquera-Cundinamarca utilizando las siguientes técnicas de análisis:

- Coliformes Totales: Método de ensayo enzimático SM 9223 B
- Coliformes Fecales: Ensayo de sustrato enzimático SM 9223 B
- DBO: Incubación a 5 días y Electrodo de Membrana SM 5210 B, 4500-0 G
- DQO: Reflujo Abierto (5220 B). Modificado-menor cantidad de reactivos
- Fosforo Total: Digestión Ácida, Ácido Ascórbico SM 4500-P B,E
- Nitrógeno Total: Macro Kjeldahl, destilación y volumetría
- Sólidos Suspendidos: Secados a temperatura 103°C – 105°C
- Sólidos Disueltos: Método gravimétrico Secados a temperatura 103°C – 105°C
- Sólidos Totales: Método gravimétrico Secados a temperatura 103°C – 105°C

7.2.5 Procesamiento de los resultados

Los resultados se procesaron en el programa Office Excel 2010, determinando los porcentajes de remoción físico-química y microbiológica de cada tratamiento comparando esta información con literatura relacionada. También se estableció una matriz comparativa entre estos sistemas de tratamiento frente a parámetros establecidos por normatividad nacional e internacional acorde con el potencial de uso o aprovechamiento para riego agrícola.

8. RESULTADOS

8.1 Desarrollo de las unidades de tratamiento

El trabajo de investigación inició con el establecimiento de la infraestructura y las adecuaciones necesarias para el desarrollo de cada unidad de tratamiento, los resultados se muestran en detalle a continuación.

8.1.1 Aforo del sistema de evacuación de aguas residuales

En primer lugar, para conocer el volumen de agua residual doméstica generado en la finca se realizaron aforos durante 8 días en todos los puntos de vertido de ésta. Con base en estos datos se determinó la cantidad de agua estimada de agua residual producida en una semana, lo que proporcionó los datos necesarios para establecer las dimensiones y la frecuencia de recarga del pozo de almacenamiento de agua gris.

Se determinaron los siguientes caudales iniciales en las tuberías de agua residual sin modificar acorde con actividades domésticas específicas⁹⁷ (Tabla 8):

Tabla 8: Caudales de las tuberías de agua residual asociada a actividades cotidianas en la Finca.

Tubería	Actividad	Aforo de caudales en L/s						Promedio L/s
Agua gris	Lavado de ropa	0,106	0,144	0,069	0,051	0,111	0,027	0,084
	Ducha regular	0,072	0,037	0,031	0,032	0,021	0,013	0,034
	En simultaneo	-	0,303	-	-	-	-	0,303
Agua de cocina	Lavado de platos y utensilios de cocina	0,044	0,029	0,032	0,020	0,022	0,014	0,026
Agua negra	Descarga de sanitario	0,075	0,070	0,061	0,068	0,069	0,071	0,069

Fuente: Autores, 2016.

⁹⁷ OPS, Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Tipos y Cantidades de aguas residuales [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan>. [Citado el 25 de Abril de 2015]

Como se puede evidenciar los tres caudales pertenecientes a: actividades de lavado de ropa, descarga del sanitario y ducha regular- lavado de ropa (en simultáneo), son las que más aportaron caudal de agua residual; no obstante esta última actividad representa el momento en el que se pueden generar acciones de lavado de ropa y ducha regular simultáneamente, situación que se presentó con poca frecuencia puesto que en los 8 aforos realizados solo se obtuvieron estos datos en una ocasión, cuyo aporte de agua residual fue poco representativo con 0,3L/s.

Teniendo en cuenta la generación constante de agua residual y sus características físico-químicas, éstas son apropiadas para ser aprovechadas como agua de regadío. Según la FAO⁹⁸, las aguas negras reducen el uso de fertilizantes en los cultivos proporcionando aportes de nutrientes como fósforo y nitrógeno; y las aguas grises favorecen en algunos casos la recarga de acuíferos o aguas subterráneas. Además pueden ser usada para irrigación de pastos y campos abiertos (sin contacto humano) sin haber recibido tratamiento alguno.

No obstante los efectos de aplicar agua residual sin tratar al suelo, ya sea a cultivos o como vertimientos puntuales, pueden conllevar a impactos indirectos desfavorables para cuerpos de agua superficiales cercanos debido a procesos de infiltración y escorrentía que acarrearán el agua residual hasta estas fuentes hídricas. Evidentemente estos impactos son muchos menores en comparación con utilizar estos cuerpos de agua superficial como receptores directos de estos vertimientos. Como se observó en los aforos realizados (Figura 18), la cantidad de agua gris que se vierte directamente al suelo puede conllevar a procesos de eutrofización teniendo en cuenta que el agua gris contiene aproximadamente 20 a 30 % de fosforo⁹⁹.

⁹⁸ WHO, Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 4 Excreta and greywater use in agriculture 2006. ISBN 92 4 154685 9 [En línea] http://www.fao.org/nr/water/docs/volume2_eng.pdf [Citado el 25 de abril de 2016]

⁹⁹ WHO, Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2 Wastewater use in agriculture. 2006 ISBN 92 4 154683 2 [En línea] http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/78265/1/9241546824_eng.pdf [Citado el 25 de abril de 2016]

Figura 18: Vertimiento puntual de aguas grises en la finca.



Fuente: Autores, 2016.

En Colombia no se encuentra establecida la reglamentación acerca de los vertimientos de agua residual al suelo como lo indica el parágrafo 1 del artículo 1 de la resolución 631 de 2015¹⁰⁰, lo que hace difuso establecer directrices sobre el manejo de este tipo de vertimientos. Por tanto las estrategias o acciones que se puedan tomar para mitigar este tipo de impactos por vertimientos al suelo de agua residual se asocian a un reúso restringido, el cual esté preferiblemente alterado por algún tipo de tratamiento.

Con base en lo aforos realizados para cada actividad de generación de agua residual previamente mencionados, así como su frecuencia y duración, se estimaron los volúmenes de aguas residual per cápita y semanal que se producen en la finca (Tabla 9).

Tabla 9: Generación de agua residual estimada para una semana.

Tubería	Actividad	Caudal promedio (L/s)	Duración de actividad por semana (s)	Generación per cápita (Litros. Hab ⁻¹ .dia ⁻¹)	Total de L por semana	Habitantes en la finca
Agua gris	Lavado de ropa	0,084	7200	43,2	604,8	2
	Ducha regular	0,034	8400	20,4	285,60	
	En simultanea	0,303 (Valor único)	-	-	-	
Agua negra	Descarga sanitario	0,069	6300	31,05	434,7	
Agua de cocina	Lavado de loza	0,026	12600	23,4	327,6	
Total				118,05	1627,7	

Fuente: Autores, 2016.

¹⁰⁰ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y o a los sistemas de alcantarillado público [En línea] https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf [Citado el 25 de Abril de 2016]

¹⁰⁰ WHO, Volume 4 op. Cit p

Se identificó de esta manera que las actividades de lavado de ropa y de descarga por uso del sanitario son las mayores generadoras de agua residual. Según estudios del IDEAM¹⁰¹ y La FAO¹⁰² los aportes de agua gris en algunos países se encuentran entre 75 y 100 Litros.Hab⁻¹.Dia⁻¹, mientras que en la finca la generación total de agua gris aprovechable (exceptuando el aporte producido en la cocina) fue de 63,6 Litros.Hab⁻¹.Dia⁻¹, situándose por debajo de los rangos mencionados. Esto puede explicarse por el restringido suministro de agua potable por parte del acueducto veredal, ya que éste solo la distribuye dos veces por semana a la finca.

Además, los aspectos climáticos, de saneamiento básico y culturales presentes en un lugar determinado condicionan la demanda de agua, lo que implica que las cantidades que se utilizan en lugares cálidos serán mayores a aquellos que pertenecen a zonas templadas o frías, por tanto la demanda de agua variará entre diferentes necesidades de uso condicionadas por el entorno y por la actividad económica que se realice. Generalmente en los sectores donde el agua se encuentra poco disponible, la generación de agua residual es poca (20 L/persona), pero a medida que la oferta aumenta, también lo hacen los aportes de agua residual¹⁰³, viéndose reflejada esta situación principalmente en países desarrollados.

El volumen total de agua residual de la finca generado en 1 semana corresponde a 1652,7 litros de los cuales 327,6 aportados por actividades de cocina no fueron aprovechados. De esta manera el agua total para aprovechamiento semanal es de **1325,1** litros aproximadamente.

8.1.2 Establecimiento del pozo de almacenamiento de agua gris

Teniendo en cuenta los volúmenes obtenidos en los procedimientos anteriores se establecieron las dimensiones para la construcción del pozo de almacenamiento del agua gris. De esta manera se excavó manualmente un pozo (Figura 19) que almacenara un volumen/semana de 1062 Litros aproximadamente de agua gris con las siguientes medidas:

- 1,10m de ancho
- 1,10m de largo
- 0,85m de profundidad

¹⁰¹ IDEAM. Estudio nacional del agua Capítulo 5 Estimación de la Demanda del Agua, 2000 [En línea] <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/021888.htm> [Citado el 25 de Abril de 2016]

¹⁰² WHO, Volume 4 op. Cit p

¹⁰³ WHO, Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 4 Excreta and greywater use in agriculture 2006. ISBN 92 4 154685 9

Figura 19 : Pozo de almacenamiento de agua gris.



Fuente: Autores, 2016.

Para la impermeabilización de este pozo se emplearon dos capas de plástico negro de polietileno calibre 400 de 18 m² y 20 m² como recubrimiento inferior y como capa superficial respectivamente. Se utilizó este material porque funciona óptimamente como recubrimiento y se encontraron usos similares en trabajos de investigación aplicada¹⁰⁴.

Estos procedimientos se realizaron durante 3 días del mes de Febrero de 2016.

8.1.2.1 Aforo de la tubería de agua gris dirigida al pozo de almacenamiento

Posteriormente se realizaron aforos durante 6 días a la tubería de agua gris dirigida hacia el pozo de almacenamiento para verificar la recarga de agua hacia éste.

Tabla 10: Caudales de la tubería de agua gris dirigida hacia el pozo de almacenamiento.

Actividad	Aforo de caudal en L/s						Promedio L/s	Volumen total en L/semana
Lavado de ropa	0,071	0,075	0,084	0,11	0,099	0,073	0,0853	914, 4
Ducha regular	0,041	0,052	0,023	0,017	0,021	0,067	0,036	
En simultanea		0,42			0,29		0,35	

Fuente: Autores, 2016.

¹⁰⁴ DURAN LORENA. Evaluación del desempeño de un conjunto de lagunas para el tratamiento de las aguas de riego provenientes del canal Tibanica 2009. Tesis de maestría en ingeniería ambiental. Universidad Nacional de Colombia. [En línea] <http://www.bdigital.unal.edu.co/1772/> [Citado el 25 de Abril de 2016]

Como se evidencia en la Tabla 10, el aporte total de agua gris no superó la capacidad del pozo de almacenamiento de la misma. Esto garantizó que la recarga hídrica semanal hacia este pozo no presentara problemas de rebose durante el transcurso de la investigación. Estos aforos fueron importantes puesto que es necesario garantizar que el sistema de tratamiento se ejecute bajo las condiciones de disponibilidad de agua, lo que está directamente relacionado con las cargas hidráulicas establecidas en cada tipo de tratamiento (lagunaje o filtración) ya que fluctuaciones en estas cargas pueden conducir a pérdidas de eficiencia afectando la calidad del efluente¹⁰⁵.

La recarga del pozo de agua gris estuvo condicionada principalmente por la actividad de lavado de ropa, ya que brindaba un aporte semanal aproximado de 614,16 litros de agua gris.

8.1.3 Establecimiento de los sistemas de tratamiento

8.1.3.1 Montaje del Filtro lento en arena

Como resultado de la adquisición de materiales y de las actividades especificadas en la metodología, se estableció la unidad de tratamiento. De esta manera se realizaron los lavados del material, el tamizado y las demarcaciones para la adición del lecho filtrante del filtro como se muestra en la Figura 20.

Figura 20: Montaje del lecho filtrante.



Fuente: Autores, 2016.

Los diámetros del material del lecho filtrante se escogieron a través de recomendaciones en la literatura^{106,107,108} y el espesor de cada capa se estableció

¹⁰⁵ HUISMAN L. *et. al.* Filtración lenta en arena. Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades; tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo, 1998. CEPIS Lima [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/020867/020867-16.pdf> [Citado el 25 de Abril de 2016]

¹⁰⁶ PÉREZ Arturo, Capítulo IV Filtración. Biblioteca Digital Universidad Nacional. Facultad de Minas [En línea] http://www.bdigital.unal.edu.co/70/6/45_-_5_Capi_4.pdf [Citado el 27 de abril de 2016]

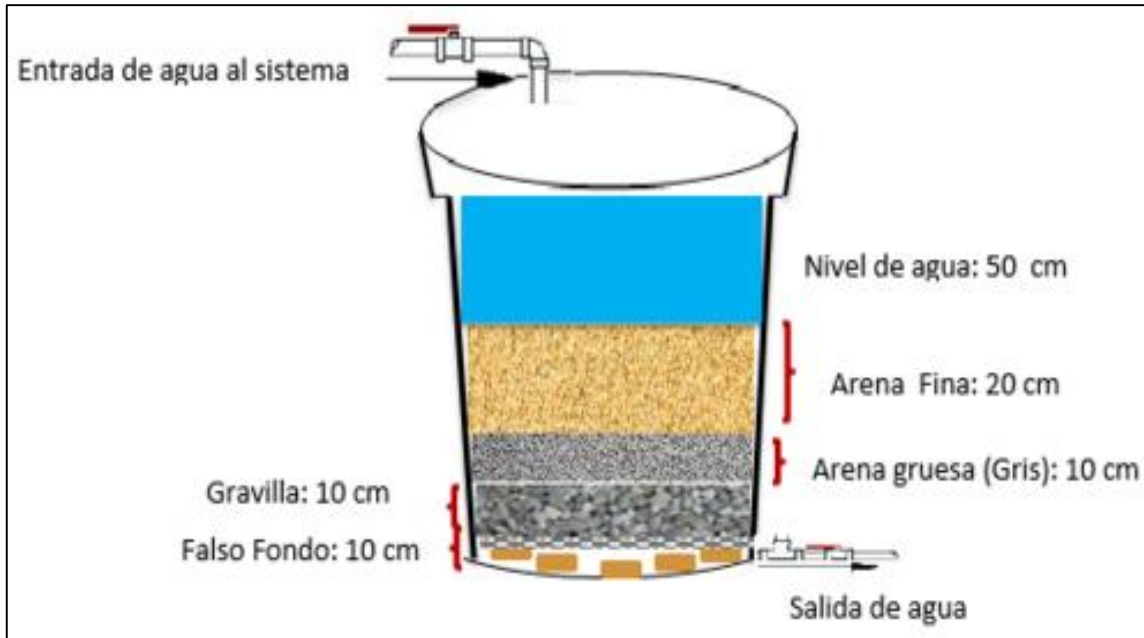
¹⁰⁷ NATIONAL ENVIRONMENTAL SERVICES CENTER, Tecnología en Breve: Filtración lenta con arena, 2009. West Virginia University

¹⁰⁸ OPS y CEPIS, Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas, 2005 p 12. Lima- Perú. [En línea] <http://www.bvsde.ops->

mediante especificaciones del Reglamento Técnico de agua potable y saneamiento básico RAS¹⁰⁹.

Finalmente se ensambló el filtro (Figura 21) depositando uniformemente las capas de material filtrante, estableciendo una altura total del lecho filtrante de 40 cm distribuido en 10 cm de gravilla (lecho de soporte), 10 cm de arena gruesa y 20 cm de arena fina.

Figura 21: Esquema del filtro lento en arena ensamblado.



Fuente: Autores, 2016.

Trabajos aplicados por la Universidad Piloto en zona rural del municipio de Tocaima en el año 2013 evidenciaron la aplicación de un sistema de filtración lenta casero elaborado con tanque de polietileno cuyos resultados fueron positivos en términos de remoción de coliformes fecales, turbiedad y color¹¹⁰. Esto demuestra la pertinencia de proyectos de tratamiento a pequeña escala que pueden generar impactos favorables en zonas de limitada oferta hídrica, ya sea para optimizar sistemas agrícolas de pequeña producción o para usos domésticos que no impliquen consumo.

oms.org/bvsacg/quialcalde/2sas/d23/029_Dise%C3%B1o_tratamiento_Filtracion_ME/Dise%C3%B1o_tratamiento_Filtraci%C3%B3n_ME.pdf [Citado el 27 de abril de 2016]

¹⁰⁹ MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Sección II, Título C, Sistemas de Potabilización. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico República de Colombia [En línea] http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/5_Sistemas_de_potabilizacion.pdf [Citado el 27 de abril de 2016]

¹¹⁰ Torres y Villanueva. Filtro de Arena Lento. Universidad Piloto de Colombia [En línea]

<http://www.unipiloto.edu.co/wp-content/uploads/2013/11/El-filtro-de-arena-Lento-a-color-para-la-web.pdf> [Citado el 27 de abril de 2016]

Desde otra perspectiva, la aplicación a mayor escala de sistemas de filtración lenta en arena muestra que se pueden satisfacer grupos poblacionales más grandes con la calidad del agua resultante después del tratamiento, como se evidencia en investigaciones en el acueducto veredal con sistema de filtración lenta desarrollado por Empresas Públicas de Medellín (E.P.M) del corregimiento de AltaVista, Medellín-Antioquia¹¹¹. La duración total del montaje del filtro lento en arena fue de 1 semana, dejándolo dispuesto a recibir las cargas hidráulicas mencionadas en la metodología para el inicio del proceso de maduración del lecho filtrante (capa superior).

Respecto a las condiciones de operación, para que el proceso de filtrado funcione correctamente es necesario que la altura del agua sobrenadante sea mínimo de 50 cm. Sin embargo, CEPIS¹¹² establece alturas de la lámina de agua en el filtro de 1 y 1,5 m, esto con el objetivo de mantener la presión hidráulica y evitar la pérdida de carga asociada a presiones osmóticas negativas producidas entre los espacios inter granulares del lecho cuando éstos se llenan de aire¹¹³ y obstaculizan el descenso del agua. Se debe tener un balance entre la altura del agua sobrenadante y la altura de la capa filtrante para no reducir la eficiencia de filtrado, y además evitar que el lecho superficial se seque o tenga una lámina de agua muy baja.

Respecto al lecho filtrante algunos autores establecen alturas de 20 cm¹¹⁴, 50 cm¹¹⁵, 70 cm o hasta 1 metro¹¹⁶, lo que muestra la variabilidad operacional del filtro en donde la altura del lecho va en función de las cargas superficiales y de las dimensiones del mismo. Sin embargo, los raspados superficiales del lecho filtrante hacen que se reduzca la altura de su capa, por lo que se recomienda disponer de una altura inicial de 1 metro hasta reducirse a 0,7m¹¹⁷ debido a los raspados. Estos raspados corresponden a procesos de limpiado y retirado de material acumulado principalmente por la turbiedad y solidos contenidos en el agua a tratar.

La altura del lecho del filtro lento en arena implementado fue de 40 cm, condicionado por la altura del tanque y por garantizar también una altura de agua sobrenadante de 50 cm. Pese a que los valores fueron inferiores a los recomendados en otras investigaciones, se mantuvieron las proporciones de la capa del lecho filtrante (50% arena fina, 25% arena gruesa y 25% gravilla) lo que es importante debido los procesos

¹¹¹ GRUPO EMP, Biblioteca Digital. Algas como bioindicadores causantes de obstrucción de filtros lentos en arena [En línea] http://www.grupo-epm.com/Portals/1/biblioteca_epm_virtual/tesis/Algas_como_bioindicadores_causantes_obturacion_filtros_arena.pdf

¹¹² OPS y CEPIS óp. cit, p. 15

¹¹³ PÉREZ Arturo, Capitulo IV Filtración. Biblioteca Digital Universidad Nacional. Facultad de Minas [En línea] http://www.bdigital.unal.edu.co/70/6/45_-_5_Capi_4.pdf [Citado el 27 de abril de 2016]

¹¹⁴ OPS y CEPIS óp. Cit p. 16

¹¹⁵ PEREZ, óp. cit, p.145

¹¹⁶ NATIONAL ENVIRONMENTAL SERVICES CENTER, Tecnología en Breve: Filtración lenta con arena, 2009. West Virginia University p.3 [En línea] http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2009_tb/spanish/slow_sand_filtration_DWFSOM143.pdf [Citado el 27 de abril de 2016]

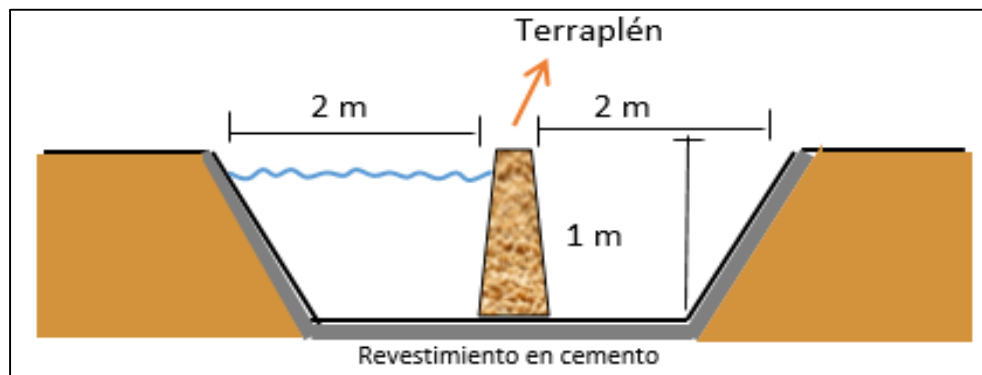
¹¹⁷ HUISMAN L. *et. al.* Filtración lenta en arena. Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades, 1998. P [En línea] <http://www.ircwash.org/sites/default/files/201-88SI-6153.pdf> [Citado el 27 de abril de 2016]

de cernido y adhesión que se llevan a cabo principalmente en la capa más alta del lecho (arena fina).

8.1.3.2 Acondicionamiento de la laguna de maduración

Una vez limpiado y despejado el terreno, se elaboró una división en la mitad de la laguna estableciendo un terraplén con los escombros recogidos y arena disponible en la finca, de tal modo que una vez compactado y bien distribuido, el terraplén actúe como muro divisor de ésta para ajustar su volumen acorde con una carga hidráulica superficial de $1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ disponible a tratar como se muestra en la Figura 22.

Figura 22: Terraplén divisorio establecido en la laguna.



Fuente: Autores, 2016.

Luego de la conformación del terraplén, la laguna se ajustó a un volumen de 2 m^3 . La profundidad recomendada para este tipo de laguna es de 1 metro o menos¹¹⁸, debido a que los sistemas de laguna de maduración necesitan tener profundidades que garanticen la oxigenación de todo el cuerpo de agua, la penetración de la radiación solar y la proliferación de algas que promueven la desinfección del agua creando un ambiente inhabitable para las bacterias fecales. Sin embargo algunos autores establecen que la sobrevivencia de estas bacterias en el agua es entre 30 a 60 días¹¹⁹, lo que puede influenciar en la determinación de los tiempos de retención hidráulicos de la laguna.

Finalmente con la laguna impermeabilizada (Figura 23), se procedió al llenado de esta con el agua residual en proporciones iguales a través del bombeo como se muestra a continuación:

¹¹⁸ ASHWORTH y SKINNER. Waste Stabilization Pond Design Manual 2011. WA Water Corporation p. 21 [En línea]

https://www.powerwater.com.au/_data/assets/pdf_file/0008/43946/wsp_design_manual.pdf [Citado el 27 de abril de 2016]

¹¹⁹ FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Wastewater treatment and use in agriculture -FAO irrigation and drainage, 1992 p 12 . ISBN 92-5-103135-5 Roma [En línea]

http://eprints.icrisat.ac.in/8638/1/RP_07946_wastewater_treatment.....pdf [Citado el 27 de abril de 2016]

Figura 23: Impermeabilización de la laguna de maduración.



Fuente: Autores, 2016.

8.1.4 Bombeo y operación de las unidades de tratamiento

8.1.4.1 Bombeo a Laguna de maduración

En primera instancia se inició el llenado de la laguna de maduración con los volúmenes y caudales ya mencionados en la metodología, esta actividad se realizó en un día, en el mes de febrero (Figura 24).

Figura 24: Llenado de laguna de maduración.



Fuente: Autores, 2016.

8.1.4.2 Bombeo al Filtro lento en arena

Adjunto a el llenado de la laguna se procedió con el bombeo hacia el filtro lento en arena para iniciar el proceso de mojado y maduración del lecho filtrante (Figura 25). Se aplicaron 50 litros con proporciones iguales de agua negra y agua gris, por lo que fue despreciable establecer mediciones de caudal con el medidor de flujo.

La maduración del lecho filtrante es un proceso fundamental para la eficiencia del filtro¹²⁰, puesto que la película biológica rica en microorganismos como bacterias, algas,

¹²⁰ NATIONAL ENVIRONMENTAL SERVICES CENTER, Tecnología en Breve: Filtración lenta con arena, 2009. West Virginia University p. 3 [En línea]
http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2009_tb/spanish/slow_sand_filtration_DWFSOM143.pdf [Citado el 27 de abril de 2016]

rotíferos protozoarios¹²¹ realiza la oxidación bioquímica de la materia orgánica, partículas suspendidas y bacterias entéricas termotolerantes. Los tiempos de maduración del filtro no han sido estandarizados ni establecidos con rigurosidad, por lo que esto queda a consideración del diseñador y de las dimensiones del filtro¹²². Sin embargo, algunos autores¹²³ plantean rangos de tiempo de maduración bastante amplios siendo desde 6 horas hasta 12 semanas. Para este trabajo se establecieron 2 semanas de maduración del filtro (16 días) ajustado a los tiempos de ejecución de la unidad de tratamiento, muestreo y análisis.

Figura 25: Llenado del filtro lento en arena.



Fuente: Autores, 2016.

Para medir las condiciones de operación del filtro se realizaron las mediciones de velocidad de filtración durante una semana (Tabla 11), y aforos en la tubería de salida del filtro en el transcurrir de un día. Para realizar las mediciones de velocidad de filtración en m/h se utilizó un tubo de PVC demarcado cada un centímetro para determinar el nivel de agua que ha descendido en el lecho filtrante.

Tabla 11: Mediciones de velocidad de filtración del filtro lento en arena.

Velocidad de filtración m/h						Promedio
0,01	0,03	0,04	0,06	0,03	0,03	0,033 m/h

Fuente: Autores, 2016.

Según el RAS la velocidad de filtración sugerida es de 0,1m/ h¹²⁴. Aunque al realizar las mediciones se evidencia que la velocidad fue 0,03 m/h, valor que está distante de los sugeridos, esto no indica que el filtro no funcione óptimamente ya que puede

¹²¹ MARTIN Laura. Diseño de una guía para la elaboración de filtros lentos de potabilización del agua p 29. 2011. Especialización en Gerencia Ambiental. Universidad Libre [En línea] <http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/3922> [Citado el 27 de abril de 2016]

¹²² HUISMAN L. *et. al.* Filtración lenta en arena. Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades; tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo, 1998 p 211. CEPIS Lima [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/020867/020867-16.pdf> [Citado el 25 de Abril de 2016]

¹²³ SANCHEZ, LATORRE y GALVIS, Periodo de maduración: efecto de la limpieza de la biomembrana en un filtro lento en arena p. 3, 20° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidad del Valle, CINARA [En línea] http://infoandina.mtnforum.org/sites/default/files/publication/files/Luis_dario_sanchez1.pdf [Citado el 25 de Abril de 2016]

¹²⁴ MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO óp. cit., p 69.

significar que el filtro tiene problemas de colmatación temprana asociadas a pérdidas de carga por taponamiento y alta suciedad en el lecho filtrante. Esta situación se puede solucionar removiendo 2 cm de la capa superficial de la arena¹²⁵. Posteriormente se debe reponer la arena retirada e iniciar nuevamente con la maduración del filtro.

Los filtros lentos al funcionar por acción de la gravedad, poseen bajas tasas de velocidad de filtración que pueden variar según el tipo de lecho filtrante o por la altura del nivel de agua sobrenadante. Algunos trabajos de investigación muestran diferentes velocidades que fluctúan entre 0,05 m/h a 0.14 m/h¹²⁶.

Tabla 12: Caudales del efluente del filtro lento en arena.

Caudal en L/h						Promedio L/h
9,36	12,6	9,36	13,68	8,28	7,2	10,08

Fuente: Autores, 2016.

Según la Tabla 12, la velocidad de filtración promedio obtenida en estos aforos mostró que el caudal de salida del efluente del filtro se encontraba notablemente por debajo de velocidades entre 18L/h y 24 L/h, establecidas en otras investigaciones.¹²⁷ Sin embargo en estudios realizados con unidades experimentales de filtros lentos de arena a bajas y altas cargas evidenciaron caudales del efluente de 1 L/h y 3 L/h¹²⁸ respectivamente, mostrando mejores eficiencias de remoción a cargas bajas, lo que muestra que el filtro lento en arena implementado se encontraba dentro de rangos óptimos de caudal del efluente.

Como resultado final de las adecuaciones realizadas en la finca en la siguiente figura se muestran la ubicación y distribución de los sistemas de tratamiento.

¹²⁵ GALVIS, LATORRE y TEUN. Fracción en múltiples etapas, tecnología para el tratamiento de aguas, p. 53. Universidad del Valle, Instituto de Investigación y desarrollo en agua potable, saneamiento básico, y conservación del recurso(CINARA) e Internacional Water and Sanitation Center [En línea]

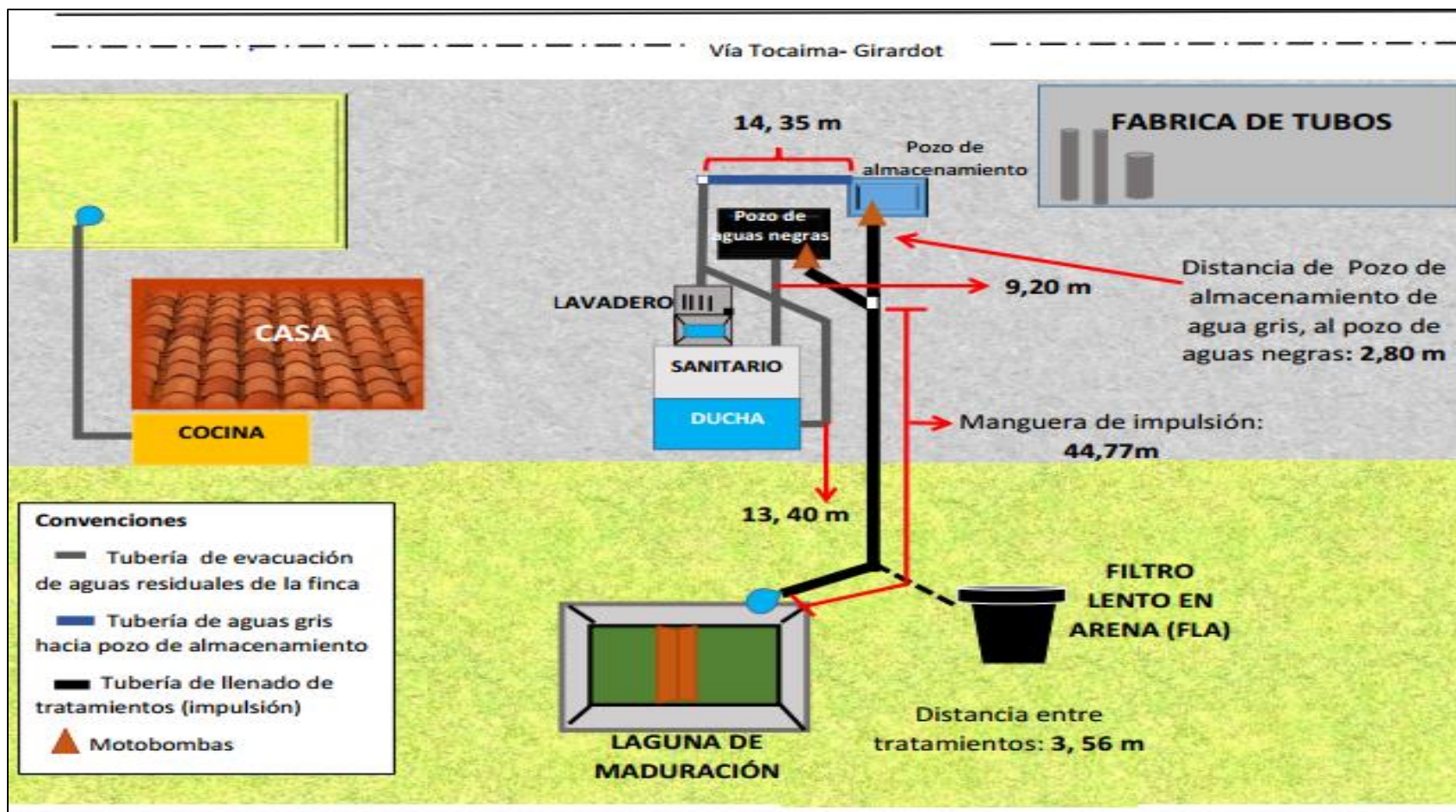
http://www.ircwash.org/sites/default/files/255_9-99FI-17025.pdf [Citado el 27 de abril de 2016]

¹²⁶ AGUIRRE Andrea. Valoración de unidades de filtración lenta en arena como alternativa para la remoción de contaminación bacteriológica en aguas residuales de efluentes secundarios anaerobios 2012 p 35. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Pereira [En línea] <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/2783/1/628162A284.pdf> [Citado el 27 de abril de 2016]

¹²⁷ CENTRE FOR AFFORDABLE WATER AND SANITATION TECHNOLOGY. Manual para el filtro de bioarena, diseño, construcción, instalación, operación y mantenimiento 2009 p 54 [En línea] https://www.calvin.edu/academic/engineering/senior-design/SeniorDesign09-10/team02/web/Biosand_Manual_Spanish.pdf [Citado el 27 de abril de 2016]

¹²⁸ AGUIRRE óp. Cit.

Figura 26: Esquema general del establecimiento de las unidades de tratamiento en la finca.



Fuente: Autores, 2016.

Ante lo observado en este esquema se denota la implementación de las dos unidades de tratamiento, así como las adecuaciones de infraestructura dentro de la finca. Este resultado permitió llevar a cabo el análisis de eficiencia de cada unidad de tratamiento a través de muestras de laboratorio realizadas al agua residual cruda y a los efluentes del filtro lento en arena y de la laguna de maduración.

8.2 Resultados de los análisis de laboratorio

La muestra de agua residual inicial y las muestras de agua tratada por las unidades de tratamiento (efluente), fueron analizadas en los meses de Febrero y Marzo en las instalaciones del laboratorio de aguas de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), sede Tibaitatá en Mosquera-Cundinamarca, con el fin de determinar la eficiencia de cada tratamiento en términos de remoción principalmente de Coliformes fecales y Coliformes totales, y de los parámetros mencionados previamente en la metodología. Los resultados se muestran a continuación.

8.2.1 Resultados de la muestra inicial de agua residual cruda

Los resultados de los análisis fueron entregados el día 2 de marzo de 2016 (Ver anexo 3) mostrando las concentraciones de cada parámetro analizado, lo que permitió establecer una caracterización base (Tabla 13) para determinar las cargas orgánicas de las unidades de tratamiento y las eficiencias de remoción de los mismos.

Tabla 13: Resultados de laboratorio de la muestra inicial de agua residual.

Parámetros	Valores de la muestra inicial de agua residual
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	255 mg/L
Demanda Química de Oxígeno	380 mg/L
Sólidos Totales	203 mg/L
Sólidos Disueltos	222 mg/L
Sólidos Suspendidos	96 mg/L
Nitrógeno Orgánico Total	250 mg/L
Fosforo Total	15,2 mg/L
Coliformes Totales	2055 NMP/100mL
Coliformes Fecales	2033 NMP/100mL
pH	8,01

Fuente: Autores, 2016.

En cuanto a los valores resultantes de la calidad del agua residual inicial se observa que los parámetros se encuentran en márgenes de concentración media y alta, según lo establecido por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible,¹²⁹ y FAO¹³⁰.

¹²⁹ MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales, 2002 p. 14 ISBN 958-9487-46-7 [En línea]

<https://www.cortolima.gov.co/SIGAM/cartillas/Residuos%20municipales.pdf> [Citado el 27 de Abril de 2016]

¹³⁰ FAO 1992 op cit p 9

Según lo anterior la DBO_5 presentó una concentración mayor a 200 mg/L, lo que significa que se sitúa dentro del rango medio-alto en una muestra de agua residual típica doméstica. Este resultado se asocia en primer lugar a la proliferación de bacterias y microorganismos que se desarrollan en el lodo séptico debido a las altas temperaturas condicionadas por la temporada seca, magnificada por el fenómeno del Niño que se presentaba en el momento del desarrollo del trabajo. En segundo lugar las temperaturas cálidas¹³¹ en el agua pudieron haber provocado una reducción en la concentración de oxígeno disuelto debido a que en verano la aireación es menos pronunciada, lo que puede corroborar estos resultados.

Referente al valor de DQO obtenido, es común observar concentraciones que doblan los valores de DBO_5 debido a que el primero representa tanto el oxígeno consumido por las reacciones químicas como el oxígeno consumido biológicamente¹³², el cual es químicamente oxidado en su totalidad por el dicromato de potasio en medio ácido (Método de reflujo abierto) cuando se realiza su análisis en el laboratorio. Valores de DQO mayores a 500 mg/L indican una concentración alta acorde a lo propuesto por el Ministerio del Ambiente, sin embargo estudios realizados con agua residual doméstica de un apartamento en México muestran valores significativamente altos de DQO (1000mg/L) lo que contrasta en sobremanera con los resultados obtenidos.

La relación DQO/ DBO_5 en las aguas residuales permite establecer el grado de biodegradabilidad del vertimiento como según se muestra en Cisterna y peña (OPS)¹³³, así para un cociente $< 2,5$ se concluye que las aguas residuales tienen la capacidad de ser depuradas por microorganismos que utilizan el contenido orgánico como materia para oxidar bioquímicamente. La relación DQO/ DBO_5 para el agua residual de la finca fue de 1,4 lo que corresponde a aguas fácilmente depuradas por microorganismos siendo importante para justificar la implementación de unidades de tratamiento naturales en este lugar.

Los sólidos suspendidos mostraron valores altos. Esto puede relacionarse con la cantidad presente de material orgánico de baja densidad representado por la materia fecal y lodo que se encuentra suspendido. Este material orgánico representa principalmente la DBO_5 insoluble y parte del nitrógeno orgánico existente en el agua residual que puede removerse por mecanismos de adherencia (Ley de Van der Waals) y cernido presentes en los tratamientos de filtración.

¹³¹RAMALHO Rubens. Tratamiento de aguas residuales 1996 p 18-19. Faculty of science and engineering Laval University Quebec, Canada ISBN: 9788429179750 Editorial: Reverte S.A.

¹³² GEOCITIES, Caracterización de aguas residuales por DBO_5 y DQO p. 7 [En línea] <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/dboydgo2.pdf> [Citado el 27 de abril de 2016]

¹³³ CISTERNA Y PEÑA Determinación de la relación DQO/ DBO_5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región, p 9. [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile13/trab-12.pdf> [Citado el 27 de abril de 2016]

El Fósforo y el Nitrógeno se encontraron a concentraciones altas debido a que la materia orgánica, orina, detergentes y proteínas en descomposición contribuyen con un gran porcentaje de nitrógeno en formas orgánicas o amoniacales y fosforo en forma de fosfatos y ortofosfatos dependiendo de la dieta, usos del agua de la población local¹³⁴ y los contenidos de nitrógeno en los tanque sépticos, los cuales son frecuentemente altos. Las aguas residuales domésticas con concentraciones de 15 mg/L de nitrógeno total y 3 mg/L de fósforo total son óptimas para ser aprovechadas para riego¹³⁵, sin embargo cuando las concentraciones de estos nutrientes superan estos valores pueden representar un riesgo considerable de contaminación por sobresaturar los suelos, lo que provoca entre otras consecuencias, la salinización de estos.

El contenido de coliformes fecales de la muestra presenta valores difícilmente comparables puesto que algunos autores exponen que el contenido de *E. Coli* es muy variable¹³⁶. Por otro lado el ministerio de ambiente establece niveles máximos de coliformes fecales de 10^9 NMP/100mL y niveles mínimos de 10^5 NMP/100mL¹³⁷, lo que significaría que el contenido de la muestra de agua residual inicial de la finca sería considerablemente bajo. Esto puede atribuirse a la dilución que podía tener la muestra, ya que fue mezclada en proporciones iguales de agua gris y agua negra, y porque la carga microbiológica generada por dos personas no involucra necesariamente niveles altos de bacterias termotolerantes.

Situación similar se presenta con el contenido de coliformes totales, en donde se observaron concentraciones bajas según los parámetros establecidos por UNESCO¹³⁸, en donde se establecen valores altos con 10^8 NMP/100 mL y bajos con 10^6 NMP/100 mL.

Los valores obtenidos para la muestra inicial de agua residual de la finca evidencian necesidades importantes de remoción de DBO, Nitrógeno, sólidos suspendidos, Coliformes fecales y totales teniendo en cuenta su probable aprovechamiento para riego. Por tanto se muestra a continuación los resultados del efluente de cada una de las unidades de tratamiento.

¹³⁴ WHO, Volume 4 op cit p 8

¹³⁵ OMS, Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en Agricultura y Acuicultura, 1989. Informe de un Grupo Científico de la OMS N° 78 [En línea]

<http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/aguresi/direc/direct.html> [Citado el 27 de abril de 2016]

¹³⁶ FAO óp. Cit p. 12

¹³⁷ MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales, 2002 p. 14 ISBN 958-9487-46-7 [En línea]

<https://www.cortolima.gov.co/SIGAM/cartillas/Residuos%20municipales.pdf> [Citado el 27 de Abril de 2016]

¹³⁸ HENZE Y COMEAU Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design, 2008 p 37. UNESCO ISBN: 9781843391883. IWA Publishing, London, UK.

8.2.2 Resultados del agua tratada por Laguna de maduración

Se muestran los resultados obtenidos del análisis de laboratorio y los porcentajes de remoción de cada parámetro medido en la muestra tratada por el sistema de laguna de maduración (informe Anexo 4).

Tabla 14: Porcentajes de remoción de la laguna de maduración.

Parámetros	Valores	Muestra inicial de agua residual	Laguna de Maduración	Porcentaje de remoción (%)
	Unidades			
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	255	202	20,8
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	380	255	32,9
Fosforo Total	mg/L	15,2	11,3	25,7
Solidos Totales	mg/L	203	150	26,1
Solidos Disueltos	mg/L	222	100	55,0
Solidos Suspendidos	mg/L	96	73	24,0
Nitrógeno Orgánico	mg/L	250	205	18,0
Coliformes Totales	NMP/100mL	2055	1023	50,2
Coliformes Fecales	NMP/100mL	2033	901	55,7
pH	-	8,01	7,3	-

Fuente: Autores, 2016.

Como se observa en la Tabla 14 los porcentajes de remoción de las concentraciones para los parámetros microbiológicos y químicos analizados varían entre un 20% y 56%. La eficiencia de esta unidad de tratamiento fue menor en comparación con la eficiencia del filtro lento en arena como se evidencia posteriormente.

Las lagunas de maduración son diseñadas para remover especialmente coliformes fecales, y por este motivo los modelos de diseño se basan en este parámetro. La remoción de coliformes totales fue menor debido (entre otros factores) a que se necesitan mayores tiempos de retención hidráulica para reducir las concentraciones de éstas, puesto que los tiempos para la inactivación de coliformes fecales varían entre 15 a 30 días y para coliformes totales de 20 a 90 a días¹³⁹.

¹³⁹ WHO óp. Cit p 24

Existen algunos modelos de diseño y estimación de eficiencia de remoción de este tipo de lagunas, no obstante los criterios de diseño no se encuentran claramente establecidos, por lo que al implementar una laguna de maduración como única unidad de tratamiento su diseño se realiza en mayor parte con criterios empíricos. Sin embargo autores como Yáñez¹⁴⁰ y Marais¹⁴¹ han tratado de modelar una serie de parámetros cinéticos ideales para implementar este tipo de lagunas.

Como primer criterio, se aplicó la fórmula de Marais para la estimación de reducción de coliformes¹⁴². Este modelo estima la reducción en la concentración de coliformes fecales al ser tratada bajo parámetros de diseño ideales, dando como resultado una concentración de 54,94 NMP/100 mL en el efluente de la laguna (Ver Anexo 8), valor que está muy por debajo del resultado obtenido. Estos autores afirman que los factores más importantes a tener en cuenta para el tratamiento son las condiciones ambientales y climáticas, por lo que los resultados pueden variar dependiendo de la zona donde se ubique cada tratamiento¹⁴³.

De la misma forma Mara asegura que las dos variables climáticas más importantes en la eficiencia de remoción en las lagunas de maduración son la temperatura y la intensidad lumínica, ya que la reducción de carga contaminante se incrementa con el aumento de estos factores climáticos¹⁴⁴. Sin embargo para un tratamiento óptimo de las aguas residuales mediante lagunaje también se deben tener en cuenta varios factores fundamentales como son el tiempo de retención hidráulico de la laguna, la calidad del efluente y el pH del agua.

Se estima una reducción de 80% con un tiempo de retención superior a 7 días y del 98% con un tiempo mayor a 12 días de acuerdo a las investigaciones realizadas con lagunas de maduración.^{145,146} En esta investigación el tratamiento tuvo reducciones de 50, 2% para coliformes totales y 55,7% para coliformes fecales en 18 días. El sistema no alcanzó los valores estimados de remoción, si se tiene en consideración que las remociones referenciadas por los autores son establecidas para sistemas de lagunaje en línea, donde la laguna de maduración se ubica como sistema terciario. Por tanto la

¹⁴⁰ YÁÑEZ Fabián, Lagunas de Estabilización p. 15 Asesor Regional en tratamiento de aguas residuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Lima Perú [En línea]

<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/04828/04828-03.pdf> [Citado el 25 de abril de 2016]

¹⁴¹ POLPRASERT, DISSANAYAKE y .THANH, Bacterial die-off kinetics in waste stabilization ponds 1983 p. 285 [En línea]

<http://www.bvsde.ops-oms.org/muwww/fulltext/repind42/bacterial/bacterial.html> [Citado el 25 de abril de 2016]

¹⁴² *Ibíd.* p. 285

¹⁴³ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, óp. cit., p 4.

¹⁴⁴ DUNCAN Mara, Design Manual for Waste Stabilization Ponds in India, 1997 p 3. ISBN 0 9519869 1 0, Lagoon University of Leeds and Chairman. Lagoon Technology International England. Technology International Ltd. [En línea]

<http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/Sewerage/articles/indiaall/indiaall.pdf> [Citado el 25 de abril de 2016]

¹⁴⁵ *Ibíd.* 79

¹⁴⁶ DURAN LORENA. Evaluación del desempeño de un conjunto de lagunas para el tratamiento de las aguas de riego provenientes del canal tibanica, 2009 p 19. Tesis de maestría en ingeniería ambiental. Universidad Nacional de Colombia. [En línea] <http://www.bdigital.unal.edu.co/1772/> [Citado el 25 de Abril de 2016]

implementación de lagunas facultativas, lagunas anaerobias y de aireación que precedan a las lagunas de maduración contribuyen a la disminución del contenido orgánico del agua cruda, garantizando un mejor rendimiento de remoción de coliformes al final del tratamiento.

Adicional al tiempo de retención, el pH en la laguna también desempeña un papel importante. A pH superiores a 9 las coliformes fecales mueren instantáneamente; la remoción biológica en las lagunas de maduración se realiza en gran medida por el metabolismo algal que evidencia su presencia en el agua cuando esta presenta una coloración verde (Figura 27) y por algunas bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Achromobacter* y *Alcaligenes spp* que realizan procesos de oxidación de la materia orgánica produciendo CO₂, el cual es utilizado por las algas como materia prima en sus procesos fotosintéticos.

Cuando el proceso fotosintético de las algas se realiza rápidamente el pH aumenta hasta 10, y es en este momento cuando ocurre la mayor remoción de coliformes en la laguna¹⁴⁷. El pH medido en la laguna fue 7,3 indicando que aun habían condiciones óptimas para la sobrevivencia de las coliformes.

Figura 27: Presencia de algas en la laguna (coloración verde).



Fuente: Autores, 2016.

Las remociones estimadas para la laguna de maduración no fueron las esperadas, sin embargo esto no indica que el sistema no funcione, ya que se deben tener en cuenta varios criterios importantes para mejorar las condiciones del tratamiento como la implementación de tratamientos preliminares que contribuyan a la disminución en las concentraciones iniciales de los principales componentes del agua residual como la DBO, y sólidos totales.

¹⁴⁷ DUNCAN Mara, Design Manual for Waste Stabilization Ponds in India, 1997 p 95. ISBN 0 9519869 1 0, Lagoon University of Leeds and Chairman. Lagoon Technology International England. Technology International Ltd. [En línea] <http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/Sewerage/articles/indiaall/indiaall.pdf> [Citado el 25 de abril de 2016]

Referente a la remoción de DBO se obtuvo una eficiencia del 20,8%; en algunas investigaciones consultadas se estima que la remoción sea menor al 70%¹⁴⁸ ya que las lagunas de maduración no están diseñadas para remover este parámetro. La carga orgánica aplicada a la laguna fue de 8,40 Kg de DBO/día, la carga orgánica superficial fue de 4.40 kg DBO/m²/día y la carga volumétrica fue de 4,40 kg/día/m³, estos valores indican la cantidad de materia orgánica agregada por unidad de tiempo o área a la laguna.

Cuando este sistema entra en funcionamiento se tiene en cuenta el coeficiente de dispersión (*d*), el cual se obtiene de la siguiente fórmula propuesta por Polprasert y Bhattaraj¹⁴⁹:

$$d = \frac{0,184[PRv(W+2Z)]^{0,489}(W)^{1,511}}{(LZ)^{1,489}}$$

Donde:

W: ancho

L: Largo

Z: Profundo

PR: Tiempo de retención

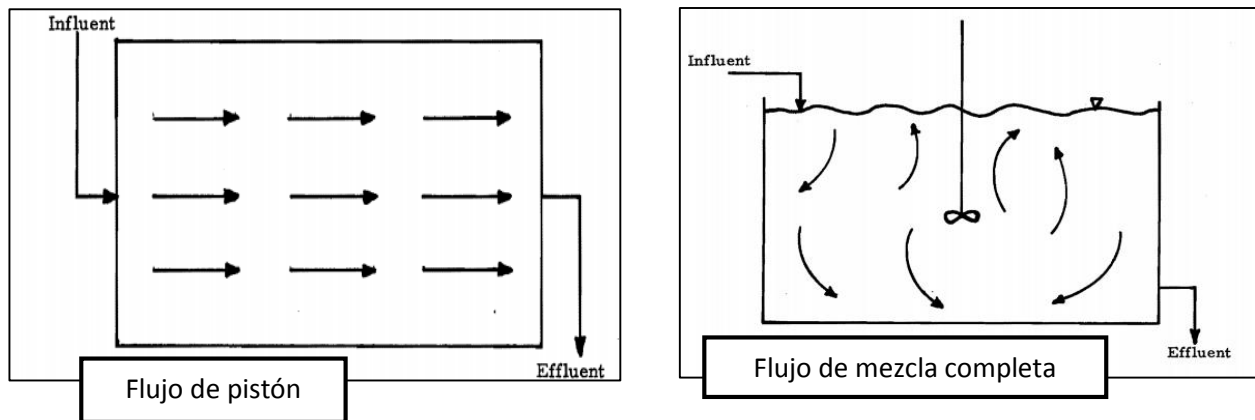
Calculando este coeficiente se obtiene un valor de **0,46** (Ver Anexo 8) determinando que es un valor cercano a cero, por ende la laguna presentó un flujo de tipo pistón o tipo arbitrario indicando que en el sistema no ocurrió una mezcla completa en la laguna (Figura 28). Bajo esta condición se presentaron cortos circuitos, zonas de estancamiento o algunas zonas muertas donde la remoción de DBO y de carga patógena se vio afectada¹⁵⁰. En la siguiente figura se puede observar que ocurre en la dinámica del flujo de pistón.

¹⁴⁸ BERNAL D.P. *et. al.* Guía de selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales domesticas por métodos naturales Seminario Internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales 2014 p. 22. Universidad del Valle y CINARA [En línea] http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-28_10-26-25111030.pdf [Citado el 25 de abril de 2016]

¹⁴⁹ CUBILLOS Armando, Estado del arte en el diseño de lagunas de estabilización, 2001 p 85 .Instituto CIDIAT. Universidad de Los Andes Mérida - Venezuela

¹⁵⁰ CRUZ et al. Metodología Para la Selección del Régimen de Flujo en Lagunas de Estabilización, 2000 p.1 Revista Ingeniería e Investigación No. 46 [En línea] <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902614.pdf> [Citado el 25 de abril de 2016]

Figura 28: Comportamiento de dos tipos de flujos en la laguna.



Fuente: Watters¹⁵¹.

Aunque al diseñar las lagunas con una relación largo-ancho de 2:1 se pretende que se reduzcan los cortos circuitos y zonas de estancamiento,¹⁵² probablemente las remociones fueron afectadas por la dinámica del flujo en la laguna. Sin embargo como ya se había mencionado anteriormente el mayor limitante en el tratamiento es la calidad misma del afluente, según Mara¹⁵³ al agua residual se le debe retirar el 75% de DBO con algún tipo de tratamiento previo preferiblemente laguna facultativa o aerobia para ingresar a una laguna de maduración. Teniendo en cuenta lo anterior, la laguna de esta investigación debió tener una DBO de entrada de 64 mg/L.

Aunque en la laguna se encuentren altos valores de DBO, sólidos y nutrientes, estos parámetros no solo representan carga contaminante, ya que la DBO y los sólidos están representados también por las algas presentes en la laguna. Se estima que un 70% de la DBO pertenece a la demandada por las actividades metabólicas de las algas.¹⁵⁴ De la misma manera la remoción de sólidos es baja debido a la presencia de algas en el efluente final, en forma de sólidos suspendidos.

La remoción de sólidos en la laguna de maduración fue poco significativa. Algunos autores estiman remociones menores a un 50% en sólidos suspendidos con afluentes con contenidos de éstos entre 66—383 mg/L¹⁵⁵. Se observa una condición similar en

¹⁵¹ WATTERS Gary, The Hydraulics of Waste Stabilization Ponds, 1972 p. , Utah Water Research Laboratory College of Engineering Utah State University

¹⁵² ROJAS Y LEÓN, Lagunas Facultativas en serie y en paralelo criterios de dimensionamiento, 1990. Organización Panamericana de la Salud (OPS) Lima, Perú [En línea]

<http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind42/lagunas/lagunas.html> [Citado el 27 de Abril de 2016]

¹⁵³MARA Duncan, op cit., 1997 p 12. International England. Technology International Ltd.

¹⁵⁴ Ibíd. p. 45

¹⁵⁵ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, óp. cit., p 11-13.

los valores iniciales de la laguna con una concentración de 96 mg/L y una remoción de 24%, observándose poca eficiencia de tratamiento.

Las remociones de nitrógeno varían entre un 70 y 90 % en tratamientos donde se implementan varias lagunas, en el caso de una sola unidad de tratamiento estas remociones fueron bajas con una remoción de nitrógeno de 18%. El nitrógeno que proviene de las aguas residuales aproximadamente tiene un 75% de nitrógeno amoniacal, y el restante se presenta como nitrógeno orgánico¹⁵⁶. El 20% de nitrógeno orgánico queda atrapado en las células de las algas siendo inmovilizado y el otro 80% queda disponible para ser hidrolizado, por lo que al finalizar el tratamiento el nitrógeno orgánico queda sedimentado en los lodos de la laguna. Por otra parte el nitrógeno que está en forma gaseosa necesita valores de pH superiores de 9.5¹⁵⁷ para que se volatilice ya que cuando se presentan pH inferiores a este es probable que esta forma de nitrógeno no sea removido de la laguna.

Referente a la eliminación del fósforo, Mara habla de remociones inferiores a 45%¹⁵⁸ asociada a la sedimentación como fósforo orgánico en la biomasa de las algas. Adicionalmente el fósforo presente en las aguas residuales se precipita en forma inorgánica en el fondo de la laguna.

La acumulación de 1 mg/L de fósforo por las algas está acompañada por el consumo de 33 a 78 mg/L de carbono y de 11 a 12 mg/L de nitrógeno debido al que el crecimiento de las algas se lleva a cabo bajo una relación de consumo de N/P de 5:1 a 10:1. De esta manera aquella fracción de nutrientes quedara en el interior de las células de las algas, dando a entender que una mejor manera de aumentar la eliminación de fósforo y nitrógeno corresponde a aumentar las unidades de tratamiento para que estos se sedimenten¹⁵⁹.

¹⁵⁶ GAWASIRI Banda, Modern Design of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates: Comparison with Traditional Design Methods 2003 p17-19, Master of Science in Environmental Engineering and Project Management. University of Leeds [En línea] http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/Mcarlo/documents/Chimwemwe_Final.pdf [Citado el 27 de Abril 2016]

¹⁵⁷ MARA Duncan óp. cit. P 27

¹⁵⁸ MARA Duncan óp. cit. P. 28

¹⁵⁹ DUNCAN Mara, Design Manual for Waste Stabilization Ponds in India, 1997 p 95. ISBN 0 9519869 1 0, Lagoon University of Leeds and Chairman. Lagoon Technology International England. Technology International Ltd. [En línea] <http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/Sewerage/articles/indiaall/indiaall.pdf> [Citado el 25 de abril de 2016]

8.2.3 Resultados del agua tratada por filtro lento en arena

Se muestran los resultados obtenidos del análisis de laboratorio y los porcentajes de remoción de cada parámetro medido en la muestra tratada por el sistema de filtración lenta en arena (informe de análisis Anexo 5).

Tabla 15: Porcentajes de remoción del filtro lento en arena.

Parámetros	Valores	Muestra inicial de agua residual	Filtro lento en arena	Porcentaje de remoción (%)
	Unidades			
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	255	60	76,5
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	380	60	84,2
Fosforo Total	mg/L	15,2	8	47,4
Sólidos Totales	mg/L	203	40	80,3
Sólidos Disueltos	mg/L	222	20	91,0
Sólidos Suspendidos	mg/L	96	21	78,1
Nitrógeno Orgánico	mg/L	250	100	60,0
Coliformes Totales	NMP/100mL	2055	8	99,6
Coliformes Fecales	NMP/100mL	2033	Ausentes	100,0
pH	-	8.01	7,7	-

Fuente: Autores, 2016.

Como se observa en la tabla los porcentajes de remoción generales para el filtro lento en arena fueron significativos puesto que sobrepasan el 70 % en todos los parámetros analizados, exceptuando el fosforo total.

Teniendo en cuenta la concentración de DBO de la muestra inicial del agua residual sin tratar, se determinaron las cargas orgánicas y cargas orgánicas superficiales del filtro lento en arena las cuales fueron 0.06 Kg de DBO/día y fue de 0,01 Kg/m².día respectivamente. La carga manejada (0,03 m/h) correspondió a una tasa lenta de filtración si se compara con cargas hidráulicas manejadas por otros autores donde establecen que valores entre 0,10 a 0,20¹⁶⁰ m/h son recomendados. Sin embargo la carga hidráulica manejada por el filtro fue óptima teniendo en cuenta la eficiencia de remoción obtenida.

Las principales funciones de un filtro lento en arena consisten en remover las bacterias o microorganismos patógenos presentes en el agua residual a través de un lecho biológico desarrollado y remover consigo las partículas sólidas presentes como sólidos

¹⁶⁰ AGUIRRE óp. Cit p. 34

disueltos, suspendidos y en general como DBO¹⁶¹. Su principal mecanismo de depuración se sustenta en la implementación de un lecho filtrante de arenas, el cual se caracteriza por tener una comunidad amplia de organismos que consumen y biodegradan la materia orgánica y las bacterias presentes en la materia fecal, logrando altas tasas de remoción.

Es tan favorable el uso de este tipo de filtros en sistemas domésticos que en países desarrollados ha sido utilizado desde 1872 para la potabilización de agua, lo que hace evidente su gran asertividad para uso en riego si se tiene en cuenta que la calidad del agua tratada para este fin es similar o menor a la calidad del agua potable en términos microbiológicos.

Se conoce que los filtros de arena son limitados en la reducción de la turbiedad ya que se pueden obstruir ante altas concentraciones de ésta, sin embargo en afluentes con turbiedades menores a 10 UNT (nivel intermedio) pueden presentar resultados favorables de remoción en el efluente. De la misma manera el color en el agua residual puede ser removido limitadamente por el filtro debido a que no ocurren procesos de aglomeración de material húmico (floculación). No obstante, en trabajos realizados con filtros lentos de arena anteceditos de un pre-filtro de grava mostraron resultados de remoción de turbiedad de un 76%¹⁶², lo que muestra que al adicionar otra unidad de tratamiento, los resultados de remoción de turbiedad pueden aumentar significativamente.

Teniendo en cuenta que la remoción de turbiedad no fue tenida en cuenta dentro de los parámetros analizados, se observa una disminución cualitativamente considerable en comparación al agua tratada por la laguna de maduración, como lo evidencia la Figura 29.

¹⁶¹ GUCHI Ephrem, Review on Slow Sand Filtration in Removing Microbial Contamination and Particles from Drinking Water, 2015 p 49 , *American Journal of Food and Nutrition*, Vol. 3, No. 2, 47-55

¹⁶² ROMÁN R. et. al. Caracterización de un filtro lento de arena con un prefiltro de flujo horizontal de grava p. 91 Universidad de Puerto Rico [En línea]
<http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/31/27> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

Figura 29: Agua tratada por el filtro lento en arena (izq.) y agua tratada por la laguna de maduración (der).



Fuente: Autores, 2016.

El funcionamiento de un filtro lento en arena se basa además en procesos físico-químicos de transporte, puente químico, adherencia, fuerzas electrostáticas y fuerzas de Van de Waals¹⁶³, lo que implica que es importante tener en cuenta las dinámicas físicas de la relación lecho filtrante-agua residual. Cuando el lecho filtrante empieza a recibir las cargas orgánicas presentes en el agua residual, y en general todo el material a remover, los granos de arena del medio filtrante empiezan a aprovechar su área superficial para retener las partículas sólidas que por transporte llegan a ellos, y a medida que el filtro entra en funcionamiento la acumulación de estos depósitos de material sólido genera un aumento del área superficial de filtrado¹⁶⁴. Por tanto se obtiene un aumento en la eficiencia de remoción de partículas sólidas, como sólidos suspendidos con remoción del 78% y de sólidos disueltos con un 91%.

La remoción de sólidos suspendidos está relacionada directamente con la granulometría del lecho filtrante como lo indican estudios donde tamaños de grano de 0,17 mm y 0,35 mm significaron una reducción del 95.99%¹⁶⁵. Es decir que los procesos de cernido ocurridos en el filtro implementado fueron óptimos, además el tamaño de grano de la arena fina establecida para este tratamiento fueron adecuados según los resultados obtenidos.

Se observaron remociones óptimas de los parámetros de DBO y DQO con una concentración en el efluente de 76,5 mg/L y un 84,2 mg/L respectivamente. Estos resultados se deben a la relación cercana entre la carga hidráulica del filtro y la

¹⁶³ PEREZ óp. cit. p.

¹⁶⁴ CEPIS, Teoría, Diseño y control de los procesos de clarificación del agua, 1973 p 317. Departamento de Ingeniería y Ciencias del Ambiente. Serie técnica 13. [En línea]<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320-00.pdf> [Citado el 27 de Abril de 2016]

¹⁶⁵ MARSHALL Gary, Intermittent Sand Filtration to Upgrade Existing Wastewater Treatment Facilities, 1974 p. 6. Utah State University. Water Research Laboratory [En línea]

http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1225&context=water_rep [Citado el 27 de Abril de 2016]

eficiencia de remoción, puesto que se ha demostrado que a cargas hidráulicas bajas (dependiendo de las dimensiones del filtro) la remoción de DBO es significativa. Esto se explica principalmente porque la reducción biológica de contaminantes y el contacto con el medio granular toman tiempo, por lo que a cargas bajas estos procesos se realiza satisfactoriamente. Por el contrario si se manejan cargas hidráulicas muy altas es probable que el agua pase tan rápido por el lecho filtrante que no haya tiempo suficiente para que ocurran los mecanismos físicos y biológicos de remoción.

La altura del agua sobrenadante del filtro presenta una gran influencia para los mecanismos de oxidación de la materia orgánica en la capa superficial donde se encuentra establecido el *schmutzdecke*. Según estudios, se indica que una altura mayor a 50 cm genera un descenso en los niveles de difusión de oxígeno y una formación de la capa biológica más delgada¹⁶⁶, lo que repercute directamente en la disminución del metabolismo como acción depuradora por parte de los microorganismos. Sin embargo como se mencionó anteriormente, otros autores manifiestan que pueden haber alturas de agua sobrenadante de hasta 1 metro¹⁶⁷.

Las eficiencias de remoción de nitrógeno por parte de los filtros lentos en arena no son muy claras aun. Algunos estudios asocian la disminución de su concentración a procesos de nitrificación a través de la demanda química nitrogenada de oxígeno con un alto consumo de este¹⁶⁸ y por el consumo bacteriano de amonio. Por otra parte se puede establecer una relación directa entre la profundidad del lecho en el que suceden las reacciones de nitrificación/desnitrificación y la carga hidráulica del filtro como lo discute Aslan¹⁶⁹, en donde se establecieron remociones favorables en los primeros 10 cm de la capa superficial a cargas hidráulicas bajas (0,01 m/h). Teniendo en cuenta estas comparaciones se puede deducir que las remociones de nitrógeno del filtro lento en arena fueron bajas probablemente por los raspados a la capa filtrante que se realizaron durante el desarrollo del proyecto para disminuir el taponamiento detectado por descensos en el caudal del efluente del filtro.

La remoción más baja obtenida fue para el fósforo total con solo un 47% de eficiencia. Estos resultados se corroboran con otros estudios que establecen que una de las limitaciones de los filtros lentos en arena son las remociones de fósforo¹⁷⁰. A pesar de

¹⁶⁶ NAJI Zaidun *et. al.* The effect of sand filter characteristics on removal efficiency of organic matter from grey water, 2011, p 146. *Al-Qadisiya Journal For Engineering Sciences* Vol. 4 No. 2 [En línea] <http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aid=33554> [Citado el 27 de Abril de 2016]

¹⁶⁷ PEREZ óp. cit. p.148

¹⁶⁸ ADAMS Elizabeth, The Effectiveness of a slow- sand filter at a road maintenance facility, 2006, p. 29. Thesis of master of Science in Civil Engineering [En línea] https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstream/10125/20487/1/M.S.Q111.H3_4076_r.pdf [Citado el 27 de Abril de 2016]

¹⁶⁹ ASLAN Sukru, Biological nitrate removal in a laboratory-scale slow sand filter, 2007 p.102. *Cumhuriyet University Department of Environmental Engineering 58140 Sivas/Turkey* [En línea] http://www.wrc.org.za/Knowledge%20Hub%20Documents/Water%20SA%20Journals/Manuscripts/2008/01/WaterSA_2008_01_2_041.pdf [Citado el 27 de Abril de 2016]

¹⁷⁰ National Small Flows Clearinghouse. Sand Filters [En línea] <https://engineering.purdue.edu/~frankenb/NU-prowd/sand.htm> [Citado el día 27 de abril de 2016]

esto, los efectos en las eficiencias de remoción por aplicación de diferentes cargas hidráulicas a filtros son evidentes en estudios donde se encontraron porcentajes de remoción del 76% en cargas hidráulicas bajas y 48% para las altas. Otros estudios muestran que las eficiencias de remoción de fosforo fluctúan de un 30% a 75%¹⁷¹ lo que puede relacionarse con los resultados obtenidos.

Es evidente que los resultados de remoción de coliformes totales y coliformes fecales fueron muy favorables, principalmente por la condición de ausencia de estas últimas en el efluente. La remoción de coliformes fecales fue del 100% lo que corrobora resultados en investigaciones cuya remoción fue del 99,96% obedeciendo a una tasa de filtración de 0,04 m/h¹⁷², la cual fue muy cercana a la obtenida en el filtro lento de arena de esta investigación con un valor de 0,03 m/h. Algunos autores establecen que la disminución de bacterias en el filtro depende principalmente del tamaño del grano de la arena pero no de la carga orgánica¹⁷³.

Sin embargo, la granulometría y la carga hidráulica no son los únicos aspectos responsables de la remoción de coliformes. Existen además mecanismos biológicos muy importantes asociados al schmutzdecke (capa superficial) como lo son la predación, descensos metabólicos, muerte natural y e inactivación. Los procesos de predación se realizan principalmente por una amplia comunidad de bacterias como *Pseudomona* y *Aeromonas*, rotíferos, algas, protozoos y en general organismos oligotróficos con un amplio rango de adaptabilidad a sustratos^{174,175}.

Se ha registrado que en los primeros 2 cm de la capa superficial del filtro ocurren los procesos de mayor remoción bacteriana¹⁷⁶. De esta manera el schmutzdecke y el medio filtrante guardan una especial relación en términos de remoción bacteriana puesto que el proceso de maduración de la capa biológica brinda al filtro las mejores condiciones para desempeñar su labor de desinfección, no obstante se conoce de eficiencias importantes de remoción de bacterias aun cuando el agua atraviesa el lecho filtrante sin madurar completamente.

Respecto al proceso de maduración de la capa filtrante se obtuvieron buenos resultados al utilizar un tiempo de 16 días para tal fin. El proceso de maduración es muy variable

¹⁷¹ ADAMS op. Cit. p. 69

¹⁷² SRINIVASA Lingireddy , Control of Microorganisms in Drinking Water, 2002, p 117. Library of Congress Catalog Card No: 2. ISBN 0-7844-0635-9 Virginia [En línea] <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0130896> [Citado el día 27 de abril de 2016]

¹⁷³ MARSHALL óp. Cit. p. 35

¹⁷⁴ GUCHI op. Cit. p 50-51

¹⁷⁵ DONISON Kori. Household scale slow sand filtration in the Dominican Republic, 2004, p. 13-16 .Thesis of master of engineering in civil and Environmental. SB Civil and Engineering Environmental Engineering Massachusetts Institute of technology

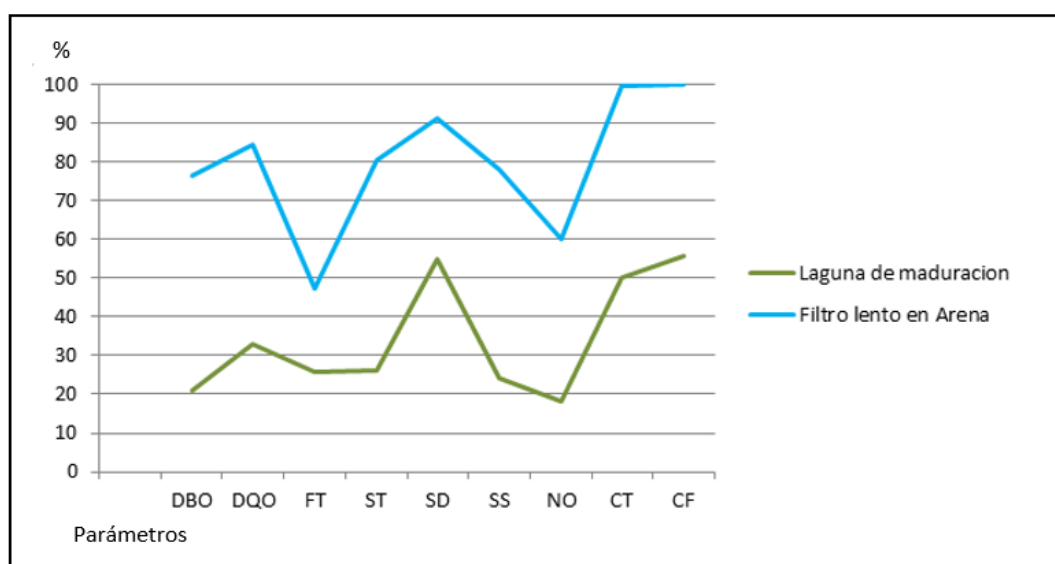
¹⁷⁶ GUCHI óp. cit. p. 52

y puede estar sujeto a aspectos como el tamaño efectivo del grano, coeficiente de uniformidad de la arena, o incluso por la carga orgánica que recibe el filtro, por lo que se hace difícil el establecimiento de un periodo ideal de maduración. En filtros de arena con una carga de 0,25m/h, un tamaño efectivo de 0,34mm y un coeficiente de uniformidad de 2 se ha registrado necesidades de maduración de 6,3 meses¹⁷⁷.

Por otro lado se sugieren periodos mucho más cortos para la instauración de la capa biológica, pero lo que si se ha demostrado ampliamente en muchas investigaciones es que las eficiencias de remoción de bacterias y protozoos aumentan a un 99,9% cuando el schmutzdecke se ha establecido¹⁷⁸.

Teniendo en cuenta lo anterior, el filtro lento en arena mostró una alta eficiencia para remover coliformes totales y fecales debido al manejo de cargas hidráulicas bajas, el uso de arena fina con diámetros de 0,2mm y a la formación de un schmutzdecke optimo mediante un proceso de maduración de 16 días.

Grafica 1: Desempeño de remoción de los tratamientos implementados.



DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno; **DQO:** Demanda Química de Oxígeno; **FT:** Fosforo Total; **ST:** Solidos Totales; **SD:** Solidos Disueltos; **SS:** Solidos Suspendedos; **NO:** Nitrógeno Orgánico; **CT:** Coliformes Totales y **CF:** Coliformes Fecales

Fuente: Autores, 2016.

¹⁷⁷ COLLINS *et. al.* Evaluating Modifications to slow sand filters, 1991, p.67. American Water Works Association. *Journal AWWA* [En línea] <http://healthycanadians.gc.ca/publications/healthy-living-vie-saine/water-dissolved-solids-matieres-dissoutes-eau/index-eng.php> [Citado el 27 de Abril de 2016]

¹⁷⁸ GUCHI *óp. cit.* p. 49

Es evidente al observar esta grafica que el tratamiento con mejores resultados de remoción fue el filtro lento de arena, y como lo confirman varios autores¹⁷⁹, este tipo de tratamiento permite realizar una óptima depuración de agua residual doméstica. Además, en este trabajo de investigación se tienen en cuenta otras variables como lo son el costo de implementación y el volumen de agua depurada mensual para determinar también cual tratamiento es más efectivo desde la perspectiva económica y de inversión (Anexo 6).

Si se enfoca la mirada hacia la posibilidad de aprovechamiento o de reúso del agua residual tratada por cada unidad de tratamiento hay que hacer un análisis detallado de los componentes fisicoquímicos y microbiológicos que por su concentración, darían aptitud de reúso agrícola a estas aguas.

No basta entonces con reducir las cargas contaminantes, sino también garantizar aguas inocuas para posteriores usos en regadío. Hay que tener en cuenta que las aguas de regadío se clasifican en diversos tipos según sea el riego, sus condiciones físico químicas y microbiológicas.

8.3 Condiciones para reúso agrícola

Las aguas residuales domésticas tratadas pueden ser reutilizadas en actividades que impliquen necesidades de riego, lo que permite satisfacer demandas del recurso hídrico asociadas a actividades agrícolas de gran o pequeña escala contribuyendo a la conservación de fuentes de agua superficial, subterránea o gasto de agua potable.

En zonas cuya oferta hídrica es limitada, la opción de reúso hídrico es algo importante a considerar teniendo en cuenta las importantes pérdidas de agua en los cultivos por procesos de evapotranspiración. Además, si se integran fenómenos climáticos como el fenómeno de El Niño, las sequias pueden intensificarse y generar grandes limitaciones al sector agrícola independientemente de si es grande, mediano o pequeño productor.

Teniendo en cuenta lo anterior, y según los resultados obtenidos para cada unidad de tratamiento se establecen las posibilidades de reúso en riego agrícola de los efluentes de la laguna de maduración y el filtro lento en arena.

En primer lugar, uno de los factores más importantes que se deben tener en consideración para reutilizar el agua residual tratada son las concentraciones de sólidos disueltos totales. Los sólidos disueltos están representados principalmente por

¹⁷⁹ BERNAL D.P. *et al.* Óp. Cit p. 22

sales inorgánicas (Cationes de Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio; y aniones como Bicarbonatos, Nitratos y Cloruros) y en menor cantidad por materia orgánica disuelta en el agua¹⁸⁰.

La particularidad de los sólidos disueltos totales radica en que concentraciones elevadas de estos crean un desequilibrio en las presiones osmóticas de la planta, causando que ésta se esfuerce más para tomar el agua del suelo y por ende se aumente el gasto de energía para sus procesos metabólicos. Similarmente los sólidos disueltos totales ocasionan corrosión e incrustaciones en ductos y tuberías que transportan el agua residual lo que puede representar gastos en mantenimiento y limitación en el riego. Según la FAO¹⁸¹, las concentraciones por debajo 450 mg/L permiten una irrigación sin ningún tipo de restricción, lo que permite concluir que tanto el agua tratada por el filtro lento en arena y por la laguna de maduración son aptas de ser regadas bajo el parámetro de SDT. Incluso el agua residual cruda de la finca posee concentraciones muchos menores a este criterio de calidad.

Por otra parte los sólidos suspendidos totales son los principales precursores de los taponamientos en las tuberías de sistemas de riego debido a la materia orgánica suspendida o a masas bacterianas presentes en el agua. Según criterios de calidad de agua para riego de la Unión Europea, se aceptan concentraciones de hasta 30 mg/L, siendo positivo para el filtro lento en arena con una concentración en el efluente 21 mg/L y negativo para la laguna de maduración puesto que el contenido se mantuvo aún muy alto con 73 mg/L.

En cuanto a los niveles de DBO y DQO, las concentraciones obtenidas en las dos unidades de tratamiento no alcanzan los valores establecidos por FAO¹⁸² y Unión Europea.

Un factor clave que beneficia profundamente los sistemas agrícolas corresponde a la fertilización resultante tras el riego con agua residual tratada. Las concentraciones de nitrógeno y fosforo representan una gran oferta de nutrientes a las plantas y pueden constituir también grandes beneficios económicos y ambientales por minimización del uso fertilizantes comerciales y por reducción de descarga de nutrientes a aguas superficiales respectivamente.

¹⁸⁰ Government of CANADA. Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document - Total Dissolved Solids (TDS), 1978 [En línea]

<http://healthycanadians.gc.ca/publications/healthy-living-vie-saine/water-dissolved-solids-matieres-dissoutes-eau/index-eng.php> [consultado el 27 de abril de 2016]

¹⁸¹ FAO, Technical handbook on pressurized irrigation techniques : Chapter 7 Water quality for irrigation, 2000 p.7.24 [En línea] <ftp://ftp.fao.org/aql/aglw/docs/pressirrig.pdf> [consultado el 27 de abril de 2016]

¹⁸² KRAMER and POST, Guidelines and Standards for Wastewater Reuse, p 31. Project funded by the European Union. Berlín [En línea]

http://cgi.tu-harburg.de/~awwwweb/wbt/emwater/documents/lesson_d1.pdf [consultado el 27 de abril de 2016]

Se propone una concentración de 30 mg/L para nitrógeno y 30 mg/L para fósforo¹⁸³. Según esto, las unidades de tratamiento no removieron opimamente el nitrógeno para dejarlo a concentraciones óptimas de aplicación; mientras que para el fósforo si se obtuvieron remociones favorables, lo que muestra que el agua tratada de las dos unidades de tratamiento si logro acondicionar niveles óptimos de este nutriente.

Como último parámetro pero no menos importante se encuentra el contenido de coliformes totales y fecales. Se evidencia una notable eficiencia de remoción de coliformes fecales por parte del filtro lento en arena con una concentración de cero, lo que no presenta ninguna restricción para reuso agrícola incluso si se habla de riego a frutos o vegetales de tallo corto y que se consuman crudos o sin quitar la cascara. De la misma manera el contenido de coliformes totales, aunque no se establezcan parámetros concretos para este grupo bacteriano, se puede utilizar agua para regadío con estas concentraciones.

No obstante como se mencionó anteriormente, los resultados para la laguna de maduración no fueron tan favorables puesto que ante remociones del 50% las bacterias aún se encontraban en concentraciones que no permitían su uso de riego a cultivos, especialmente si se comparan ante directrices internacionales. Sin embargo el agua trata por la laguna de maduración se puede re usar para regadío de campos abiertos o en el sector industrial.

La calidad microbiológica del agua para reuso en riego agrícola debe caracterizarse por ser inocua tanto para los cultivos regados como para el agricultor. Además el contenido microbiológico es el parámetro más importante para evitar situaciones de contaminación o infección por patógenos, por lo que se concluye que el agua residual tratada que cumple con parámetros microbiológicos e inocuidad es el efluente del filtro lento en arena.

¹⁸³ KRAMER and POST óp. Cit. p. 20-22

8.3.1 Factores determinantes en las eficiencias de remoción

Cuadro 4: Análisis de remoción de los parámetros analizados.

Muestras Parámetros	Muestra 1	Muestra 2 (tratamiento en laguna de maduración)				Muestra 3 (Tratamiento en filtro lento en arena)			
	Agua sin tratamiento	Resultados	Remoción según Bibliografía	Remoción del tratamiento	Determinante de remoción	Resultados	Remoción según bibliografía	Remoción del tratamiento	Determinante de remoción
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	255	202	M	B	Tasas hidráulicas bajas y crecimiento algal.	60	M	M	Tasas hidráulicas bajas. Tamaño del grano. Profundidad del lecho
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	380	255	-	B	No establecido	60	-	M	Temperatura (32 °C) ¹⁸⁴
Fosforo Total (mg/L)	15,2	11,3	B	B	Crecimiento algal, pH > 9,5 y remoción de sedimentos	8	A	B	No establecido
Sólidos Totales (mg/L)	203	150	M	B	Tasas hidráulicas y crecimiento algal	40	A	M	Tamaño del grano de la arena. Tasa hidráulica. ¹⁸⁵
Sólidos Disueltos (mg/L)	222	100	-	B		20	-	A	

¹⁸⁴ NAJI Zaidun *et. al*, op. cit, p. 127

¹⁸⁵ MARSHALL óp. Cit. p. 33

Sólidos Suspendidos (mg/L)	96	73	-	B	Tasas hidráulicas y crecimiento algal	21	-	M	Tamaño del grano de la arena. Tasa hidráulica
Nitrógeno Orgánico (mg/L)	250	205	M	B	pH > 9,5 crecimiento algal y temperatura > 20°C	100	A	M	Nitrificación/ Desnitrificación Biológica. ¹⁸⁶ Filtro aireado
Coliformes Totales (NMP/100 mL)	2055	1023	A	B	pH > a 9,5, oxígeno disponible, radiación solar y tiempo de retención	8	M	A	Maduración del filtro Actividad heterotrófica, Tiempo de retención y Adsorción bacteriana. ¹⁸⁷
Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	2033	901	A	B		0	M	A	

Fuente: Autores, 2016.

Según la magnitud de remoción se asignaron los valores cualitativos de la siguiente manera:

B: Baja 0- 70%

M: Media 70- 90% A: Alta 90-100%¹⁸⁸

¹⁸⁶ BREISHA Gaber, Bio-removal of nitrogen from wastewaters-A review, 2010, p. 217-221. *Nature and Science* ISSN: 1545-0740 [En línea] http://www.ijofamericanscience.org/journals/am-sci/am0612/60_4121am0612_508_528.pdf [Citado el 27 de Abril de 2016]

¹⁸⁷ GUCHI óp. Cit. p. 49-52

¹⁸⁸ Bernal D. P. *et. al.* óp. cit. p. 21

En el Cuadro 4 se muestran los factores físico-químicos o medioambientales que incidieron en la eficiencia de cada unidad de tratamiento, y se discute cada uno a continuación.

8.3.1.1 Determinantes de remoción en laguna de maduración

Referente a la laguna de maduración, diferentes autores han desarrollado modelos de diseño que han descrito el funcionamiento de estas lagunas. Estos autores concuerdan en algunos factores determinantes en la remoción de carga orgánica para este tipo de tratamiento. Los factores más influyentes según los autores mencionados y otras investigaciones realizadas¹⁸⁹ son: las concentraciones iniciales (carga orgánica) del agua a tratar, el crecimiento algal, disponibilidad de oxígeno, la intensidad lumínica, el número de lagunas que se implementen en el tratamiento y el pH, siendo este último el factor más importante en el desarrollo de los procesos de remoción en la laguna.

Las lagunas de maduración no están diseñadas para remover cargas altas de DBO ni de sólidos, por lo que es importante tener en cuenta las concentraciones iniciales de estos parámetros al momento de iniciar el tratamiento. Sin embargo cuando el agua es tratada por laguna de maduración, la DBO y los sólidos representados inicialmente en forma de materia orgánica se convierten en biomasa algal la cual se sedimenta en los lodos de la laguna¹⁹⁰.

Por tanto, la laguna de maduración es ampliamente recomendada para la remoción de patógenos presentes en el agua debido a los mecanismos biológicos llevados a cabo por bacterias aerobias, algas y algunos procesos químicos. Es por esto que factores como la temperatura y la radiación solar desempeñan un rol importante en el tratamiento, puesto que el crecimiento algal es proporcional al aumento de la temperatura, la cual se recomienda que sea mayor a 20°C¹⁹¹. La penetración de la luz en los primeros 20 cm de la laguna¹⁹² es esencial ya que promueve el proceso de la fotosíntesis de las algas, aunque ese proceso puede ser limitado si la penetración de la luz es interrumpida por los elementos que rodean la laguna como árboles o techos. Es por esto que la laguna implementada en la finca se ubicó en espacio abierto, donde no se presentaron interrupciones en la penetración de luz a la laguna.

El oxígeno resultante del proceso de fotosíntesis realizado por las algas es tomado por las bacterias aerobias que descomponen la materia orgánica presente en el agua.

¹⁸⁹ GAWASIRI Banda, Modern Design of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates: Comparison with Traditional Design Methods 2003 p 14-20, Master of Science in Environmental Engineering and Project Management. University of Leeds. [En línea] http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/Mcarlo/documents/Chimwemwe_Final.pdf [Citado el 27 de Abril de 2016]

¹⁹⁰ MARA óp. Cit. p. 6

¹⁹¹ GAWASIRI óp. cit p.23-25

¹⁹² ALI Mohammed, Stabilization pond for wastewater treatment, 2010 p.279, 283. *European Scientific Journal*, edition vol.9, No.14 ISSN: 1857- 788. Dep. University of Technology, Iraq [En línea] http://www.ewb-usa.org/files/Stabilization_Pond_for_Wastewater_Treatment.pdf [Citado el 27 de Abril de 2016]

¹⁹² MARA óp. Cit. p. 6

Estas bacterias producen a su vez el dióxido de carbono que es utilizado por las algas para su proceso fotosintético, presentándose de esta manera proceso de mutualismo en la laguna. Además las algas realizan el proceso de respiración durante la noche produciendo más dióxido de carbono. Este almacenamiento de dióxido en la columna de agua queda disponible para convertirse en carbonatos, bicarbonatos e hidroxilos que aumentan el pH del agua a valores superiores de 9,5¹⁹³.

Por lo anterior, el resultado es la eliminación de las coliformes fecales debido al aumento del pH del agua. Con ayuda de una buena entrada de luz y oxigenación, la laguna se convierte en un lugar hostil para las bacterias fecales. Cuando estas condiciones no se presentan, la remoción en la laguna se ve limitada.

Mara también menciona al viento como un factor ambiental importante, ya que este influye en el grado de mezcla que se produce en las lagunas.¹⁹⁴ La mezcla completa minimiza los cortos circuitos y la formación de zonas de estancamiento en la laguna, lo que permite una distribución uniforme de DBO, algas, oxígeno y bacterias en la columna de agua.

La remoción de nitrógeno se realiza por dos procesos: el primero es la volatilización del nitrógeno en forma de amoníaco a pH alto a una temperatura superior de 20°C, y el segundo corresponde a la asimilación del nitrógeno por parte de las algas, y su posterior acumulación intracelular en forma de nitrógeno orgánico que finalmente se deposita como sedimento en la laguna¹⁹⁵.

Por otra parte el fósforo es absorbido en su forma orgánica por las algas siendo un proceso similar al mencionado para la remoción de nitrógeno. El fósforo inorgánico se sedimenta en los lodos de la laguna en pH por encima de 9,5¹⁹⁶. Se estima que la forma más eficaz para eliminar el fósforo y el nitrógeno es aumentar el número de lagunas de maduración con el fin de facilitar la captación por las algas para que estos nutrientes se inmovilicen en el sedimento.

8.3.1.2 Determinantes de remoción en el filtro lento en arena

Como se observa en el cuadro, las más altas eficiencias de remoción (Según bibliografía) de la mayoría de los parámetros analizados se asocian al filtro lento en arena, lo que soporta los resultados del análisis de laboratorio.

¹⁹³ ASHWORTH y SKINNER. Waste Stabilization Pond Design Manual 2011. WA Water Corporation p. 50

¹⁹⁴ Mara óp. Cit. p. 21

¹⁹⁵ ASHWORTH y SKINNER op. cit. p. 50

¹⁹⁶ GAWASARI óp. cit p. 20

Por otro lado se establecieron los determinantes más importantes que influyen en una adecuada remoción de los parámetros mencionados, por lo que se propone que es importante tener en cuenta: la tasa hidráulica, el tamaño efectivo del grano de la arena, la temperatura del entorno, y la correcta maduración del filtro. Todos estos aspectos promueven los procesos físicos de remoción de partículas y los procesos biológicos de inactivación de patógenos los cuales representan todo el potencial depurador en este tipo de tratamiento.

En términos generales, se puede afirmar que casi todo el potencial de remoción y de depuración del filtro lento en arena da lugar en la delgada capa superior del lecho filtrante. Allí se llevan a cabo los procesos mencionados y es el lugar donde se encuentra desarrollada la película biológica.

Las temperaturas asociadas a climas cálidos, como el correspondiente al municipio de Tocaima permitieron una notable remoción de DBO y DQO ya que los procesos de degradación y oxidación de materia orgánica ocurren con más eficiencia a estas temperaturas (28°C-32°C). Es importante entonces mantener el filtro lento en arena en un lugar que induzca a un aumento de temperatura por lo menos en algunas horas del día. El filtro lento en arena implementado se ubicó en un espacio abierto de la finca donde estuvo sometido a condiciones de calor considerables si se tiene en cuenta que la investigación se realizó en temporada seca y ante condiciones climáticas asociadas al fenómeno de El Niño.

Para que ocurran procesos de nitrificación y desnitrificación óptimamente en el filtro se deben tener en cuenta algunas condiciones como la temperatura, pH, salinidad y oxígeno disuelto. Se recomiendan temperaturas entre los 22°C y 37°C y pH de 6 a 7,9¹⁹⁷.

Particularmente la remoción de sólidos suspendidos, totales, y disueltos está condicionada por la uniformidad y tamaño de los granos de arena; así cuando la deposición intergranular de partículas contaminantes presentes en el agua se hace significativa, los mecanismos de atrapamiento en el lecho filtrante permiten una remoción óptima de estas partículas¹⁹⁸.

Por último, se ha discutido fehacientemente acerca de los procesos biológicos de remoción dentro del filtro asociados a la capa superficial o *schmutzdecke*. El adecuado establecimiento de un filtro maduro proporciona y garantiza grandes eficiencias de remoción, una aireación adecuada también brinda condiciones favorables para el desarrollo de bacterias aerobias, y demás comunidad heterótrofa¹⁹⁹.

¹⁹⁷ BREISHA, óp. cit, p. 220

¹⁹⁸ MARSHALL, óp. cit, p. 3

¹⁹⁹ GUCHI, óp. cit, p. 53

En este cuadro por tanto, se pudo sintetizar y evidenciar los desempeños de remoción de las dos unidades de tratamiento teniendo en cuenta factores físicos, químicos, ambientales o microbiológicos como determinantes en los procesos de depuración. No obstante es importante mencionar que estos aspectos son los más importantes mas no los únicos, ya que las dinámicas fisicoquímicas y biológicas ocurridas en un filtro lento en arena son muy diversas y complejas, y según sea el caso deben ser estudiados en detalle.

Para verificar las potencialidades de reuso agrícola del agua tratada por la laguna de maduración y el filtro lento en arena, se presenta la siguiente matriz comparativa en donde se relacionan las normas y directrices de índole internacional y nacional que establecen algunos parámetros a tener en cuenta para disponer el agua residual tratada a un reuso agrícola. Es importante aclarar que las concentraciones exigidas por estas directrices corresponden al nivel más alto de restricción para el reuso asociado con el riego a cultivos que se consuman frescos, sin cocinar, o sin quitar su cascara.

Cuadro 5: Matriz comparativa entre las dos unidades de tratamiento.

Parámetro	Tratamiento implementado	Normas					
		Directriz OMS, 1989	Directriz FAO, 1999	Directriz EPA, 1992	Decreto 1594/1984	Resolución 1207/2014	Potencial para reúso en riego
DBO	LM	N/A	No cumple	No cumple	N/A	N/A	No apto
	FLA	N/A	No cumple	No cumple	N/A	N/A	No apto
DQO	LM	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	No establecido
	FLA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
Solidos totales	LM	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
	FLA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
Solidos disueltos	LM	N/A	N/A	Cumple	N/A	N/A	Apta
	FLA	N/A	N/A	Cumple	N/A	N/A	Apta
Solidos suspendidos	LM	N/A	No cumple	N/A	N/A	N/A	No apta
	FLA	N/A	No cumple	N/A	N/A	N/A	No apta
Nitrógeno total	LM	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	No establecido
	FLA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
Fosforo total	LM	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
	FLA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
Coliformes totales	LM	N/A	N/A	No cumple	Cumple	No cumple	No apta
	FLA	N/A	N/A	No cumple	Cumple	Cumple	Apta
Coliformes fecales	LM	Cumple	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple	Apta
	FLA	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Apta

Fuente: Autores, 2016.

LM: Laguna de maduración

FLA: filtro lento en arena

N/A: No aplica debido a que no se encuentra normativa disponible para estos parámetros.

Lo observado en esta matriz comparativa indica que en la mayoría de las normas o directrices no se han establecido concretamente las concentraciones aptas de los parámetros tenidos en cuenta en esta investigación. Por lo general, las consideraciones microbiológicas son las más importantes y de principal establecimiento debido a que estas influyen directamente en la posibilidad de contaminación y de riesgo de enfermedad asociada a patógenos en el agua, lo que puede explicar la falta de datos relacionados a los parámetros estudiados.

Sin embargo, y aunque no se tengan en cuenta en la matriz comparativa, existe una amplia lista de parámetros físico químicos como conductividad eléctrica, salinidad, micro elementos, elementos traza, metales pesados iones y halógenos, que son propuestos y tenidos en cuenta por todas las directrices y normas asociadas al reúso agrícola.

También se puede observar que las directrices internacionales para la calidad microbiológica del agua residual tratada para reúso agrícola son mucho más estrictas que las normas colombianas respectivas. Esto puede relacionarse principalmente porque las directrices internacionales están formuladas y soportadas para atender a los niveles de tratamiento en países desarrollados, cuyos procesos son más efectivos y pueden realizar una alta depuración del agua residual. Además porque las demandas de agua en países desarrollados son muy superiores, por lo que es necesario en un rango más amplio el reúso de agua residual.

La razón del porque las directrices internacionales no incluyen medidas del grupo de coliformes totales radica en que no todas las bacterias de este grupo son exclusivamente fecales, y por lo general las bacterias que no son fecales se encuentran en proporciones muy altas, especialmente en climas cálidos²⁰⁰. Por esto este grupo de bacterias no es confiable para constatarse como indicador de contaminación fecal, sin embargo en la normatividad colombiana si se tiene en cuenta este grupo.

Todas las normas en donde se cumple con los parámetros exigidos para coliformes totales, cumplen por consiguiente con los parámetros para coliformes fecales. Esto se explica teniendo en cuenta que las medidas de coliformes totales son mayores porque representa el contenido de un amplio número de bacterias, lo que es contrario en el contenido de coliformes fecales puesto que en este grupo se encuentran bacterias específicas que requieren mayores niveles de remoción por representar contaminación por materia fecal.

Teniendo en cuenta la discusión realizada en páginas anteriores y según lo observado en esta matriz comparativa se establece que la unidad de tratamiento de agua residual cuya calidad de agua trata cumple con parámetros normativos internacionales y nacionales respecto a condiciones microbiológicas aptas para reúso agrícola es el filtro lento en arena.

No obstante la laguna de maduración presentó conformidad de reúso agrícola en términos microbiológicos para las dos normas colombianas, aunque no alcanzó a cumplir con el contenido de coliformes totales (termotolerantes) para la resolución 1207 de 2014 ya que la concentración después del tratamiento fue de 1023 NMP/100 mL.

²⁰⁰ WHO, 2006 óp. cit p. 40

Esto se puede asociar a que la resolución 1207 es aún más restrictiva que el decreto 1594 de 1984 ya que en este último se fija un contenido de coliformes totales de hasta 5000 NMP/100 mL.

Si bien las restricciones para el riego agrícola con agua residual tratada a cultivos que se consumen frescos o sin cocinar son bastante altas, la calidad microbiológica del agua del efluente de la laguna de maduración y el filtro lento arena permite dar otras alternativas de uso como: el riego de cultivos industriales, riego de campos abiertos, riego de cultivos no consumibles o riego en donde no haya contacto directo con personas, ya que las restricciones de este tipo de riegos es inferior²⁰¹.

En Colombia el control del aprovechamiento de las aguas residuales para diversos usos no es representativo, lo que pone en riesgo potencial a las personas que manipulan el agua residual. En algunas ciudades como Bogotá, Ibagué, Ginebra (Valle)²⁰² se utilizan aguas residuales para riego sin tener control sobre la calidad de estas, lo que evidencia la falta de apropiación de la norma y del conocimiento de los riesgos potenciales a la salud y al ambiente al utilizar este tipo de agua.

Con base en esta matriz comparativa se conocieron y sintetizaron los resultados finales de esta investigación, la cual determinó la alta eficiencia del filtro para la inactivación de coliformes totales y fecales presentes en el agua residual doméstica de la finca El Jardín. Por tanto se evidencian las potencialidades de este tipo de tratamientos a escala doméstica, zonas rurales y en sistemas agrícolas emergentes, lo que propende en primera medida por la conservación del agua, mitigación de contaminación por vertimientos y por el aprovechamiento efectivo de aguas con propiedades agrícolas que repercuten directamente en la economía del hogar o del pequeño agricultor.

²⁰¹ EPA. Manual Guidelines for Water Reúse 625/ R-92/004, 1992, Washington D.C. p. 27

²⁰² Silva *et. al.*, óp. cit p. 356

9. CONCLUSIONES

La disponibilidad de agua residual estuvo garantizada en mayor proporción por la generación de agua gris en actividades domésticas en la finca aportando un 54% del volumen total generado, seguido de un aporte de 28% de agua negra y un aporte de 18% de agua de cocina (no aprovechado). La oferta de agua residual en la finca permitió la implementación y el funcionamiento de las dos unidades de tratamiento.

La laguna de maduración implementada funcionó con una capacidad de tratamiento de 2 m^3 en un tiempo de retención hidráulico de 18 días, una carga orgánica de 8,40 Kg de DBO/día, una carga superficial de 4.40 kg DBO/m²día y una carga volumétrica de 4,40 kg de DBO/m³ día. Estos parámetros de diseño se obtuvieron teniendo en cuenta las características de la infraestructura ya existente, la concentración inicial de DBO y el volumen aplicado de agua residual.

El filtro lento en arena realizó su operación con una tasa hidráulica de 260 L/día, una velocidad de filtración de 0,03 m/h, una carga orgánica de 0,066 Kg de DBO/día y una carga orgánica superficial de 0,01 Kg de DBO/m²día. Considerando que los parámetros de diseño del filtro se establecieron desde el inicio de su montaje, se pudieron obtener mejores resultados de depuración del agua residual de la finca.

El filtro lento en arena presentó mejores remociones para todos los parámetros analizados en esta investigación, siendo así el tratamiento natural más eficiente en la depuración del agua residual de la finca El Jardín.

La mejor eficiencia en la inactivación de coliformes totales y coliformes fecales se obtuvo en el filtro lento en arena con una reducción del 99,6 % y 100 % respectivamente, en comparación con los resultados obtenidos en la laguna de maduración con una remoción de 50,2 % y 55,7% en el mismo orden. Esto se asoció a los mecanismos físico-químicos y biológicos de remoción desarrollados en el filtro ante velocidades de filtración bajas, periodo de maduración de 16 días y diámetros de arena de 0,2 mm.

La eficiencia de remoción de la laguna de maduración obedece principalmente a factores ambientales de su entorno, mientras que la eficiencia de remoción del filtro está condicionada por el estado de maduración de la capa biológica (schmutzdecke).

El agua tratada por el filtro lento en arena cumplió con los requerimientos microbiológicos de contenido de coliformes fecales establecidos en las directrices internacionales y normas nacionales teniendo en cuenta el reúso agrícola del agua residual en su nivel más restrictivo. Esto permite establecer un aprovechamiento seguro e inocuo del agua tratada para riego de cultivos que se consumen frescos, sin cocinar o sin quitar su cascara.

La calidad del agua residual tratada por la laguna de maduración no cumplió con las directrices internacionales referentes a la remoción de coliformes fecales. Sin embargo se establece como apta para riego de hortalizas de tallo corto y frutos consumidos sin

quitar la cascara según el Decreto 1594 de 1984 y para riego de cultivos consumibles sometidos a procesos físicos o químicos según Resolución 1207 de 2014.

No se lograron establecer potencialidades de reúso agrícola del agua tratada en relación a los demás parámetros analizados en esta investigación debido a que las directrices internacionales y normas nacionales no tienen en cuenta estos parámetros para tal fin.

Los tratamientos implementados no presentaron olores ofensivos ni proliferación de vectores que pudieran afectar a los habitantes de la finca.

El reúso de aguas residuales tratadas por sistemas naturales representa una alternativa económica y ambientalmente viable para sistemas agrícolas domésticos, contribuyendo a la conservación del recurso hídrico y a la mitigación de problemas de contaminación al suelo y a fuentes superficiales.

10. RECOMENDACIONES

Para mejorar el sistema de tratamiento de laguna de maduración se recomienda implementar como sistema previo una laguna aerobia o facultativa que remueva en mayor medida la DBO, DQO y sólidos presentes en el agua residual. Esto con el objetivo de mejorar la calidad del afluente que ingresa a la laguna para obtener mejores eficiencias de desinfección al final del tratamiento.

Para evitar las colmataciones tempranas del filtro lento en arena es importante lavar muy bien el lecho filtrante y lograr que la arena del filtro tenga un tamaño de grano uniforme mediante el tamizado de esta.

Se recomienda hacer monitoreo de la calidad del agua residual tratada por lo menos trimestralmente para controlar y verificar si conserva sus atributos físicoquímicos y microbiológicos idóneos para el reúso agrícola.

Realizar procesos de tratamiento a diferentes tiempos de retención hidráulica en la laguna de maduración para determinar las mayores eficiencias de desinfección en un intervalo de tiempo determinado.

Para alcanzar mayores niveles de depuración del agua residual se pueden integrar los dos tratamientos implementados siguiendo la secuencia: Pozo séptico-laguna de maduración-filtro lento en arena.

Realizar procesos de mantenimiento en los tratamientos implementados. En la laguna de maduración se deben retirar los sedimentos que quedan en el fondo del estanque al transcurrir cada ciclo de tratamiento. Los residuos provenientes del mantenimiento pueden ser aprovechados como biosólidos para mejorar las condiciones nutritivas del suelo.

Para el filtro lento en arena se debe hacer un raspado de la capa superficial en el momento que la velocidad de filtrado disminuya dramáticamente, la arena retirada del filtro puede ser lavada y ser incorporada de nuevo al sistema de tratamiento teniendo en cuenta que al realizar el raspado se retira la capa biológica (schmutzdecke), por tanto el filtro debe pasar de nuevo por un proceso de maduración.

Según sea la fuente generadora del agua residual, es necesario conocer las concentraciones de otros parámetros como sales inorgánicas, metales pesados, iones y metaloides para obtener un criterio más amplio acerca de su reúso en el sector agrícola.

BIBLIOGRAFÍA

ADAMS Elizabeth, The Effectiveness of a slow- sand filter at a road maintenance facility, 2006, p. 29. Thesis of Master of Science in Civil Engineering

AGUIRRE Andrea, 2012. Valoración de unidades de filtración lenta en arena como alternativa para la remoción de contaminación bacteriológica en aguas residuales de efluentes secundarios anaerobios. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Pereira.

Alcaldía de Tocaima [En línea] http://tocaima-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/63393364313232396364633962663637/plan-de_accion-cidea.pdf [Citado 28 de octubre de 2015]

Alcaldía de Tocaima. Información General [En línea] http://tocaima-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml [Citado 28 de octubre de 2015]

ALI Mohammed, Stabilization pond for wastewater treatment, 2010 p.279, 283. *European Scientific Journal*, edition vol.9, No.14 ISSN: 1857- 788. Dep. University of Technology, Iraq

ASHWORTH y SKINNER. Waste Stabilization Pond Design Manual 2011. WA Water Corporation p. 21

ASLAN Sukru, Biological nitrate removal in a laboratory-scale slow sand filter, 2007 p.102. *Cumhuriyet University Department of Environmental Engineering 58140 Sivas/Turkey*

BERNAL D. P. *et. al.* Guía de selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales domesticas por métodos naturales Seminario Internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales 2014 p. 22. Universidad del Valle y CINARA [En línea] http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-28_10-26-25111030.pdf [Citado el 25 de abril de 2016]

BREISHA Gaber, Bio-removal of nitrogen from wastewaters-A review, 2010, p. 217-221. *Nature and Science* ISSN: 1545-0740

CANEPA. Planta de Tratamiento de Filtro Lentos, CEPIS 2013 [En línea] <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/trataqua/lenta/lenta1.html> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

CAR 2012 Plan de Acción de Educación Ambiental del CIDEA [En línea] <http://tocaima-cundinamarca.gov.co/apc-aa->

<files/63393364313232396364633962663637/plan-de-accion-cidea.pdf> [Citado 28 de octubre de 2015]

CENTRE FOR AFFORDABLE WATER AND SANITATION TECHNOLOGY. Manual para el filtro de bioarena, diseño, construcción, instalación, operación y mantenimiento 2009 p 54

CEPIS Filtración Lenta en Arena, 1989 p.2 [En línea] <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan/007697/07697-01b.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

CEPIS, Teoría, Diseño y control de los procesos de clarificación del agua, 1973 p 317. Departamento de Ingeniería y Ciencias del Ambiente. Serie técnica 13

CEPIS. Inventario de la Situación Actual de las Aguas Residuales Domésticas en Colombia, Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial 2003. [En línea] http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/proyecto/inventario/col_in.pdf [Citado el 5 de Octubre de 2015]

COLLINS *et. al.* Evaluating Modifications to slow sand filters, 1991, p.67. American Water Works Association. *Journal AWWA* Government of CANADA. Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document - Total Dissolved Solids (TDS), 1978 [En línea] <http://healthycanadians.gc.ca/publications/healthy-living-vie-saine/water-dissolved-solids-matieres-dissoutes-eau/index-eng.php> [consultado el 27 de abril de 2016]

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Diseño de lagunas de estabilización 2007. ISBN: 978-968-817-880-5 México D.F. p. 28

CONPES 3177. 2002. Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del plan nacional de manejo de aguas residuales. Sección IV [En línea] <http://www.minvivienda.gov.co/conpesagua/3177%20-%202002.pdf> [Citado 28 de octubre de 2015]

Constitución política de Colombia. 1991. Título 2. Capítulo 3. [En línea] http://www.unesco.org/culture/natlaws/media/pdf/colombia/colombia_constitucion_politica_1991_spa_orof.pdf [Citado 28 de octubre de 2015]

CRUZ *et al.* Metodología Para la Selección del Régimen de Flujo en Lagunas de Estabilización, 2000. Revista Ingeniería e Investigación No. 46 p.1

CUBILLOS Armando, Estado del arte en el diseño de lagunas de estabilización, 2001 p 85 .Instituto CIDIAT. Universidad de Los Andes Mérida - Venezuela Decreto 1207. 2014. Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Artículos 6 y 7. [En línea] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=59135> [Citado 28 de octubre de 2015]

DECRETO 1594 de 1984. Presidencia de la Republica, Por la cual se reglamenta los usos del agua y residuos líquidos. Ministerio de Agricultura y Ministerio de salud [En línea] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

Decreto 3930. 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Artículos 5, 7,9 y 13. [En línea] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620> [Citado 28 de octubre de 2015]

DONISON Kori. Household scale slow sand filtration in the Dominican Republic, 2004. Thesis of master of engineering in civil and Environmental. SB Civil and Engineering Environmental Engineering Massachusetts Institute of technology, p. 14

DUNCAN Mara, Design Manual for Waste Stabilization Ponds in India, 1997 p 3. ISBN 0 9519869 1 0, Lagoon University of Leeds and Chairman. Lagoon Technology International England. Technology International Ltd.

DURAN LORENA. Evaluación del desempeño de un conjunto de lagunas para el tratamiento de las aguas de riego provenientes del canal Tibanica 2009. Tesis de maestría en ingeniería ambiental. Universidad Nacional de Colombia. [En línea] <http://www.bdigital.unal.edu.co/1772/> [Citado el 25 de Abril de 2016]

EOT del Municipio de Tocaima ACUERDO No. 024-2008

EOT Municipio de Obando, Tipos de Suelos [http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/eot_componente_gral_tabla_4_obando_\(2_pag_13_kb\).pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/eot_componente_gral_tabla_4_obando_(2_pag_13_kb).pdf) [Citado 28 de octubre de 2015]

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Wastewater treatment and use in agriculture -FAO irrigation and drainage, 1992 p 12 . ISBN 92-5-103135-5 Roma

FAO, Technical handbook on pressurized irrigation techniques: Chapter 7 Water quality for irrigation, 2000 p.7.24 [En línea] <http://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/pressirrig.pdf> [consultado el 27 de abril de 2016]

FAO. Agua y Cultivos logrando el uso óptimo del agua en la agricultura, 2002 [En línea] ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/cropsdrops_s.pdf [Citado el 5 de Octubre de 2015]

FAO. Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Informe sobre temas hídricos 2013 [En línea] <http://www.fao.org/docrep/017/i1629s/i1629s.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

GALVIS, LATORRE y TEUN. Fracción en múltiples etapas, tecnología para el tratamiento de aguas, p. 53. Universidad del Valle, Instituto de Investigación y desarrollo en agua potable, saneamiento básico, y conservación del recurso (CINARA) e Internacional Water and Sanitation Center [En línea] <http://www.ircwash.org/sites/default/files/255.9-99FI-17025.pdf> [Citado el 27 de abril de 2016]

GAWASIRI Banda, Modern Design of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates: Comparison with Traditional Design Methods 2003 p17-19, Master of Science in Environmental Engineering and Project Management. University of Leeds

GRUPO EMP, Biblioteca Digital. Algas como bioindicadores causantes de obstrucción de filtros lentos en arena [En línea] http://www.grupo-epm.com/Portals/1/biblioteca_epm_virtual/tesis/Algas_como_bioindicadores_causantes_obstruccion_filtros_arena.pdf

GUCHI Ephrem, Review on Slow Sand Filtration in Removing Microbial Contamination and Particles from Drinking Water, 2015 p 49 , *American Journal of Food and Nutrition, Vol. 3, No. 2, 47-55*

HENZE Y COMEAU Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design, 2008 p 37. UNESCO ISBN: 9781843391883. IWA Publishing, London, UK. <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=59135> [Citado el 10 de Octubre de 2015]
<https://www.google.it/maps>

HUISMAN L. *et. al.* Filtración lenta en arena. Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades; tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo, 1998. CEPIS Lima [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/020867/020867-16.pdf> [Citado el 25 de Abril de 2016]

IDEAM. Guía para el Monitoreo y Seguimiento del Agua 2004 [En línea] http://www.fing.edu.uy/imfia/cursos/hidrometria/material/Guia_de_Monitoreo.pdf [Citado el 10 de Octubre de 2015]

IDEAM, Determinación de *E. Colí* y Coliformes Totales en Agua 2007 [En línea] <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Coliformes+totales+y+E.+coli+en+Agua+Filtraci%C3%B3n+por+Membrana.pdf/5414795c-370e-48ef-9818-ec54a0f01174> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

IDEAM. Estudio nacional del agua Capitulo 5 Estimación de la Demanda del Agua 2010, p 175. [En línea] <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/021888.htm> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

INSTITUTO GEOGRÁFICO Y MINERO DE ESPAÑA, Nuevas tecnologías para el saneamiento, depuración y reutilización de las aguas residuales en la provincia de Alicante. Capítulo III Métodos naturales de tratamiento 1995. [En línea] <http://doc.igme.es/BUSCADORHIDRO/DOCUMENTOS/LIBROS/TECNICAS%20HIDROGEOLOGICAS/LIBRO033/LIBRO033.PDF> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

KESTLER, Patricia. Uso, Reúso y reciclaje del agua residual en una vivienda 2004 [En línea] http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/fulltext/uso_reuso.pdf [Citado el 10 de Octubre de 2015]

KRAMER and POST, Guidelines and Standards for Wastewater Reuse, p 31. Project funded by the European Union. Berlín [En línea] http://cgi.tu-harburg.de/~awwwweb/wbt/emwater/documents/lesson_d1.pdf [consultado el 27 de abril de 2016]

LEON, Parámetros de calidad para el uso de aguas residuales. Guías de calidad de efluentes para la protección de la salud. CEPIS 1995, p. 5 [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/aya2/tema04.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

Ley 99. 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Artículos 31, 44 y 67. [En línea] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=297> [Citado 28 de octubre de 2015]

MANGA et al. Reusó de aguas residuales un recurso disponible. Universidad del Norte Barranquilla 2001. Guía de investigadores tecnología del Agua [En línea] <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/2271/1483> [Citado el 5 de Octubre de 2015]

MARSHALL Gary, Intermittent Sand Filtration to Upgrade Existing Wastewater Treatment Facilities, 1974 p. 6. Utah State University. Water Research Laboratory

MARTIN Laura. Diseño de una guía para la elaboración de filtros lentos de potabilización del agua p 29. 2011. Especialización en Gerencia Ambiental. Universidad Libre

MINISTERIO DE AGRICULTURA. Desarrollo de la Fruticultura en Cundinamarca 2006 [En línea] http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_106_Plan%20NaI%20Ofrur-cundinamarca.pdf

MINISTERIO DE AGRICULTURA. Proyecto: Desarrollo de capacidades del uso seguro de aguas residuales para la agricultura. Reporte Nacional 2011 [En línea]

http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/127/COLOMBIA.pdf [Citado el 10 de Octubre de 2015]

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y o a los sistemas de alcantarillado publico

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS) 2000, Título C sección 2, p. 61-70

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales, 2002 p. 14 ISBN 958-9487-46-7

MORENO et al. La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno fundamentos y casos prácticos Capítulo 2 2003 [En línea] http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/indice.htm [Citado el 10 de Octubre de 2015]

MORENO. Conceptos básicos de microbiología de las aguas subterráneas. Capítulo 4 1998 [En línea] [http://doc.igme.es/BUSCADORHIDRO/DOCUMENTOS/LIBROS/CALIDAD%20Y%20CONTAMINACION%20DE%20ACUIFEROS/LIBRO008\(FOTO%20PEQUE%C3%91A\)/LIBRO008.PDF](http://doc.igme.es/BUSCADORHIDRO/DOCUMENTOS/LIBROS/CALIDAD%20Y%20CONTAMINACION%20DE%20ACUIFEROS/LIBRO008(FOTO%20PEQUE%C3%91A)/LIBRO008.PDF) [Citado el 10 de Octubre de 2015]

MOSCOSO. Casos prácticos de uso de aguas residuales, 2004 [En línea] <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/aya2/tema13.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

MOSCOSO. Reúso de aguas residuales en Perú. Taller Regional para América sobre Aspectos de Salud, Agricultura y Ambiente, vinculados al uso de Aguas Residuales, organizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 1993 [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/repin53/arp/arp.html> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

NAJI Zaidun *et. al.* The effect of sand filter characteristics on removal efficiency of organic matter from grey water, 2011, p 146. *Al-Qadisiya Journal For Engineering Sciences* Vol. 4 No. 2

NARANJO, Francisco. Alternativas ecológicas para el manejo de aguas residuales N° 152, 2010. Asesor de CEGESTI [En línea] http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_152_130611_es.pdf [Citado el 10 de Octubre de 2015]

NATIONAL ENVIRONMENTAL SERVICES CENTER, Tecnología en Breve: Filtración lenta con arena, 2009. West Virginia University

National Small Flows Clearinghouse. Sand Filters [En línea] <https://engineering.purdue.edu/~frankenb/NU-prowd/sand.htm> [citado el día 27 de abril de 2016]

NUÑEZ. Turba y zeolita como soportes de inoculantes microbianos con acción fertilizante. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) ISSN: 0138-6204 2009 [En línea] <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120660004.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

OMS, Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en Agricultura y Acuicultura, 1989. Informe de un Grupo Científico de la OMS N° 78 [En línea] <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/aguresi/direc/direct.html> [Citado el 27 de abril de 2016]

OPS y CEPIS, Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas, 2005 p 12. Lima- Perú
OPS, Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Tipos y Cantidades de aguas residuales [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan>. [Citado el 25 de Abril de 2015]

OPS. Filtros lentos de arena. Tratamiento domiciliario 1997 [En línea] <http://www.col.ops-oms.org/saludambiente/guia-filtros.htm> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

PARREIRAS. Tratamiento de aguas residuales disposición en suelo, Universidad Federal de Viçosa, 2005 [En línea] http://www.sarsan.com.br/docs/CURSO_SOBRE_tratamento_esgoto.pdf [Citado el 10 de Octubre de 2015]

PÉREZ Arturo, Capítulo IV Filtración. Biblioteca Digital Universidad Nacional. Facultad de Minas [En línea] http://www.bdigital.unal.edu.co/70/6/45_-_5_Capi_4.pdf [Citado el 27 de abril de 2016]

PLAN DESARROLLO TOCAIMA- CUNDINAMARCA “Inclusión para la prosperidad de Todos 2012-2015”, Acuerdo No. 005 Mayo 24 DE 2012

POLPRASERT, DISSANAYAKE y .THANH, Bacterial die-off kinetics in waste stabilization ponds 1983 p. 285 [En línea] <http://www.bvsde.ops-oms.org/muwww/fulltext/repind42/bacterial/bacterial.html> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

Reglamento técnico de saneamiento y agua potable RAS. 2000. Título E, sección II. [En línea] http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/7.Tratamiento_de_aguas_residuales.pdf [Citado 28 de octubre de 2015]

RESOLUCIÓN 1207 de 2014 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas [En línea]

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=59135> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

ROJAS Y LEÓN, Lagunas Facultativas en serie y en paralelo criterios de dimensionamiento, 1990. Organización Panamericana de la Salud (OPS) Lima, Perú [En línea]

<http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind42/lagunas/lagunas.html>

[Citado el 27 de Abril de 2016]

ROJAS, Ricardo. Curso Internacional “Gestión integral de tratamiento de aguas residuales” Conferencia Eliminación de Microorganismos por diversos Procesos de Tratamiento CEPIS, 2002 [En línea]

<http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/micro.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

ROMÁN Roque *et. al.* Caracterización de un filtro lento de arena con un prefiltro de flujo horizontal de grava p. 91 Universidad de Puerto Rico [En línea]

<http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/31/27> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

ROSKOSNY Milos *et al.* Natural Technologies of Wastewater Treatment 2014 [En línea]

http://www.gwp.org/Global/GWP-CEE_Files/Regional/Natural-Treatment.pdf

[Citado el 10 de Octubre de 2015]

SANCHEZ, LATORRE y GALVIS, Periodo de maduración: efecto de la limpieza de la biomembrana en un filtro lento en arena p. 3, 20° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidad del Valle, CINARA

SECRETARIA DISTRITAL DE SALUD DE BOGOTÁ. Dirección de Salud Pública Área Vigilancia en Salud Pública 2011 [En línea]

<http://www.saludcapital.gov.co/sitios/VigilanciaSaludPublica/Todo%20Emergencias/Guia%20Atenci%C3%B3n%20de%20Brotos%20ETA1%20Vr%204.pdf>

[Citado el 5 de Octubre de 2015]

SILVA Jorge *et al.* Reusó de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. Artículo Científico. *Agronomía Colombiana* 2008 Vol. 26 No.2 374-379 [En línea]

http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TILLEY%20et%20al%202010%20Compendio%20de%20Sistemas%20y%20Tecnologias%20de%20Saneamiento%20SPANISH.pdf [Citado el 5 de Octubre de 2015]

SRINIVASA Lingireddy. Control of Microorganisms in Drinking Water, 2002, p 117. Library of Congress Catalog Card No: 2. ISBN 0-7844-0635-9 Virginia

Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 22 ND Edición 2012 ISBN 978-087553-013-0. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation sección 9-10

TILLEY E. *et. al.* Compendio de sistemas y tecnología de saneamiento, Alianza por el agua, ISBN 978-3-906484-48-8 2008 [En línea] http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TILLEY%20et%20al%202010%20Compendio%20de%20Sistemas%20y%20Tecnologias%20de%20Saneamiento%20SPANISH.pdf [Citado el 18 de abril de 2016]

TORRES y VILLANUEVA. Universidad piloto de Colombia, 2014. El filtro de arena lento: Manual para el armado, instalación y monitoreo. [En línea] <http://www.unipiloto.edu.co/wp-content/uploads/2013/11/El-filtro-de-arena-Lento-a-color-para-la-web.pdf> [Consultado el 28 de abril de 2016]

UNESCO. Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, Agua y Energía Resumen Ejecutivo, 2014 [En línea] <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002269/226962s.pdf> [Citado el 5 de Octubre de 2015]

UNESCO. Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo, Agua para un mundo sostenible, Datos y Cifras, 2015. [En línea] http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts_Figures_SPA_web.pdf [Citado el 5 de Octubre de 2015]

UNICEF. Enfermedades comunes relacionadas con el agua y el saneamiento [En línea] http://www.unicef.org/spanish/wash/index_wes_related.html [Citado el 5 de Octubre de 2015]

WATTERS Gary. The Hydraulics of Waste Stabilization Ponds, 1972 p. , Utah Water Research Laboratory College of Engineering Utah State University

WHO, Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 4. Excreta and greywater use in agriculture 2006. ISBN 92 4 154685 9

WHO, Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2 Wastewater use in agriculture.2006 ISBN 92 4 154683 2

WHO. Health Guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture, 1989. Technical Report Series 778 Geneva [En línea] http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/39401/1/WHO_TRS_778.pdf [Citado el 5 de Octubre de 2015]

YÁNEZ Fabián, Lagunas de Estabilización p. 15 Asesor Regional en tratamiento de aguas residuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Lima Perú

ANEXOS

Anexo 1: Tabla de enfermedades causadas por microorganismos en el agua residual.

Microorganismos	Enfermedades	Descripción
Bacterias		
<i>Enterococcus faecalis</i>	Endocarditis	Infecciones de vejiga y próstata
<i>Streptococcus bovis</i>	Septicemia y Endocarditis	Infecciones y meningitis
<i>Bifidobacterium</i>	Saprofita*	Saprofita
<i>Rhodococcus coprophilus</i>	Enfermedades biliares	Benignas
<i>Micromonospora</i>	Saprofita	Saprofita
<i>Streptomyces</i>	Saprofita	Saprofita
Bacterias de la putrefacción		
<i>Pseudomona aeruginosa</i> <i>Pseudomana fluorescens</i>	Neumonía	infecta los pulmones y las vías respiratorias, las vías urinarias, los tejidos, (heridas), y también causa otras infecciones generalizadas en el organismo
<i>Proteus vulgaris</i>	Enfermedades urinarias	Infecciones urinarias, de heridas y en abscesos hepáticos.
<i>Bacillus cereus</i>	Envenenamiento	Diarrea crónica
<i>Bacillus subtilis</i>	Intoxicación	Diarrea
<i>Enterobacter cloacae</i>	Infecciones	Infecciones del tracto urinario, de herida y quirúrgica
Indicadores Fecales		
<i>Clostridium botulinum</i>	Botulismo	Parálisis flácida de los músculos esqueléticos y un fallo parasimpático
<i>Eschechiria coli</i>	Gastroenteritis	Diarrea e intoxicación
<i>Salmonella sp</i>	Salmonelosis	Fiebre alta, diarrea, úlceras en el intestino delgado

<i>Shigella sp</i>	Shigelosis	Infección aguda del revestimiento del intestino.
<i>Mycobacterium sp</i>	Tuberculosis	Infección contagiosa que compromete principalmente a los pulmones, pero puede propagarse a otros órganos
<i>Brucella sp</i>	Brucelosis	Cefalea, fiebre, mialgias y sudoración excesiva
<i>Legionella sp</i>	Legionelosis	Enfermedades respiratorias
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	Es una infección del intestino delgado que ocasiona una gran cantidad de diarrea acuosa
<i>Leptospira sp</i>	Leptospirosis	Ictericia, hemorragia cutánea, fiebre, escalofríos y dolor muscular
<i>Yersinia entecolítica</i>	Yersinosis	Afecta el tracto intestinal
Hongos y levaduras		
<i>Fusarium acueductum</i>	Infección	Leve en el sistema gastrointestinal
<i>Sacharomyces</i>	Fermentador	
<i>Candida</i>	Candidiasis	Infección que causa manchas blancas en la boca, o comen y picazón en algunas partes del cuerpo
<i>Cryptococcus</i>	Meningitis	Inflamación de las meninges (tejido que cubre el sistema nervioso central)
<i>Rhodotorula</i>	Infecciones	Infección de vías urinarias
Virus y bacteriófagos		
<i>Poliovirus</i>	Poliomelitis	Ataca al sistema nervioso, parálisis total o parcial

<i>Coxsackie</i>	Enfermedades respiratorias, anomalías cardíacas	Leptospirosis, fiebre y vómitos
<i>Echo</i>		
<i>Hepatitis A</i>	Hepatitis infecciosa	
<i>Rotavirus</i>	Gastroenteritis	
<i>Reovirus</i>		
<i>Enterovirus</i>	Enfermedades respiratorias, gastroenteritis	
<i>Adenovirus</i>		
Protozoos		
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiasis	Diarrea, disentería
<i>Cryptosporidium</i>	Criptosporidiosis	Diarrea
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebiasis	Diarrea prolongada con sangre, abscesos en el hígado y el intestino delgado
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis	Diarrea, náuseas, indigestión
Helmintos		
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis	Infestación de gusanos
<i>Enterobius vericularis</i>	Enterobiasis	Gusanos
<i>Fasciola hepática</i>	Fascioliasis	Gusanos (tercera)
<i>Hymenolepis nana</i>	Hymenlepiasis	Tenia enana
<i>Taenia saginata</i>	Teniasis	Tenia (buey)
<i>T. solium</i>	Teniasis	Tenia (cerdo)
<i>Trichuris trichiura</i>	Trichuriasis	Gusanos

Fuente: OMS, CEPIS 2002²⁰³.

²⁰³Rojas 2002 Curso Internacional "Gestión integral de tratamiento de aguas residuales" Conferencia Eliminación de Microorganismos por diversos
Procesos de Tratamiento CEPIS [En línea]
<http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/micro.pdf> [Citado el 10 de Octubre de 2015]

Anexo 2: Proceso de muestreo.

1. Preparación de la muestra inicial

Se agregó a un envase de 60L., 20 litros agua gris y 20 litros de agua negra para preparar la muestra inicial.



2. Remover la mezcla

Crear una corriente en la mezcla



3. Tomar la muestra

Se sumergió el frasco sin destaparlo a 15 cm de profundidad aproximadamente, de manera horizontal ubicándolo a contra corriente y destapándolo adentro del agua, se selló herméticamente.



4. Rotulación de las muestras

Se secó cada frasco y se procedió a rotular cada muestra con la siguiente información:

Nombre del lugar: Finca el jardín, Vereda la Salada- Tocaima-
Cundinamarca

Tipo de muestra: Simple

Lugar de colección:

Fecha y hora:

Muestreadores: Brayan Riascos- Alejandra Ortiz

Análisis requeridos:

Preservante: pH:

Volumen total: 500 mL

Dirigido a: CORPOICA Tibaitata- Mosquera Cundinamarca



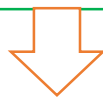
5. Calibración del pH metro

Antes de agregar los preservantes a cada muestra, se calibró el pH metro con las soluciones buffer de pH de 4 y 7.



6. Medir el pH de la muestra

Se destapó el frasco destinado para sólidos totales para realizar la medición del pH.



7. Agregar preservantes a las muestras

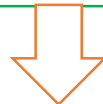
Las muestras para DBO y coliformes totales y fecales no se destaparon ya que no necesitan preservante.

Las muestras para análisis de Nitrógeno Total, DQO y fosforo total se preservaron agregando ácido sulfúrico hasta alcanzar pH 2



8. Preparar las muestras para el transporte

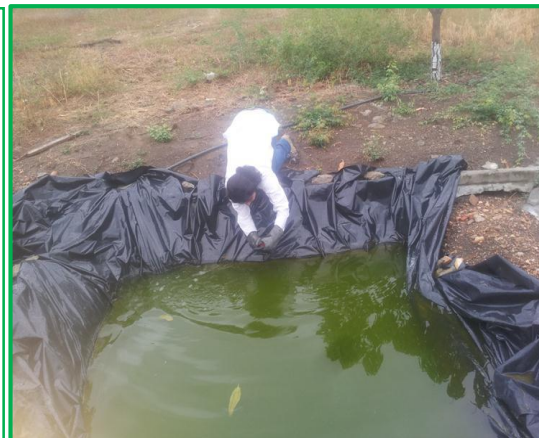
Se recubrieron los frascos de las muestras con papel aluminio, se refrigeraron a 4°C y se transportaron al laboratorio.



9. Toma de muestra en la laguna

Se tomó la muestra aproximadamente a 15 cm de profundidad, destapándolos y posteriormente sellándolos dentro del agua, evitando la contaminación del frasco por contacto con la atmosfera.

Se repitieron los pasos del 4 al 9 para



10. Toma de muestra en el filtro




Se ubicó un envase limpio en el efluente del filtro lento hasta llenar la totalidad de este. Las muestras fueron tomadas de este envase.

Se repitieron los pasos del 4 al 9



Anexo 3: Resultados del análisis de laboratorio de la muestra inicial.


INFORME N° 6-MI16 (15011) Daniel Cubillos 2015-03-01

	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	Código: VC_F_116	
	Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras	Fecha de vigencia: (01-02-2016)	
LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA			
1. Información del cliente			
Nombre y Apellido:	DANIEL CUBILLOS	 	
Cédula o NIT	11366512		
Dirección:	CLL 7 2-05 INT 6 CASA 5		
Dpto:	CUNDINAMARCA		
Municipio:	TOCAIMA		
Tel. fijo/Celular:	3214295583-8207359		
Análisis solicitado:	QUIMICO Y MICROBIOLÓGICO DE AGUA		
2. Información de la muestra		Número de solicitud 6	
Matriz:	AGUA	Andrea Navarrete. (E6994) Líder Unidad de Laboratorio de Microbiología	
Presentación	LIQUIDO		
Finca:	NO INDICA		
Fecha de muestreo:	2016-02-15		
Fecha de recepción:	2016-02-16		
Fecha(s) de análisis:	2016-02-15		
Fecha de reporte:	2016-03-01		
DETERMINACIÓN ANALÍTICA			
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO Y QUÍMICO DE AGUA RESIDUAL NO TRATADA			
Código de laboratorio	UNIDADES		
	MÉTODOS		
	IDENTIFICACIÓN		
AM16-15011	UF/100ml PPM		
	AOAC 2003.01	AOAC	
	PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADO
	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO	ppm	255
	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	ppm	380
	FOSFORO TOTAL	ppm	15.2
	SÓLIDOS TOTALES	ppm	203
	SÓLIDOS DISUELTOS	ppm	222
	SÓLIDOS SUSPENDIDOS	ppm	96
	NITRÓGENO ORGÁNICO	ppm	250
	COLIFORMES TOTALES	NMP/100 ml	MAYOR A 1000
	COLIFORMES FECALES	NMP/100 ml	MAYOR A 1000
Observaciones:			
Los resultados son válidos únicamente para la muestra en referencia. Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma. Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de CORPOICA.			
CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3 CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATA KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA) TELÉFONOS: 4227300 EXT: 1414 E-MAIL: ypaeZc@corpoica.org.co			

FIN DEL INFORME

Anexo 4: Resultados de análisis de laboratorio de muestra de agua tratada en laguna de maduración.


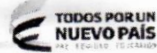
INFORME N° 6-MI16 (15011) Daniel Cubillos 2015-03-01

	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	Código: VC_F_116
		Versión: 2
	Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras	Fecha de vigencia: (01-02-2016)

LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA

1. Información del cliente

Nombre y Apellido: DANIEL CUBILLOS
 Cédula o NIT: 11366512
 Dirección: CLL 7 2-05 INT 8 CASA 5
 Dpto: CUNDINAMARCA
 Municipio: TOCAIMA
 Tel. fijo/Celular: 3214295583-8207359
 Análisis solicitado: QUIMICO Y MICROBIOLÓGICO DE AGUA

Número de solicitud
8

2. Información de la muestra

Matriz: AGUA
 Presentación: LIQUIDO
 Finca: NO INDICA
 Fecha de muestreo: 2016-02-15
 Fecha de recepción: 2016-02-23
 Fecha(s) de análisis: 2016-02-24
 Fecha de reporte: 2016-03-01

Andrea Navarrete, (E6994)
 Líder Unidad de Laboratorio de Microbiología

DETERMINACIÓN ANALÍTICA

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO Y QUÍMICO DE AGUA RESIDUAL NO TRATADA

Codigo de laboratorio	UNIDADES MÉTODOS IDENTIFICACIÓN	UFC/100ml	PPM	AOAC
AM16-15011	PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADO	
	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO	ppm	202	
	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	ppm	255	
	FOSFORO TOTAL	ppm	11.3	
	SÓLIDOS TOTALES	ppm	150	
	SÓLIDOS DISUELTOS	ppm	100	
	SÓLIDOS SUSPENDIDOS	ppm	73	
	NITRÓGENO ORGÁNICO	ppm	205	
	COLIFORMES TOTALES	NMP/100 ml	MAYOR A 1000	
	COLIFORMES FECALES	NMP/100 ml	MEJOR A 1000	

Observaciones:

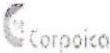
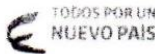
Los resultados son válidos únicamente para la muestra en referencia
 Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.
 Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de CORPOICA

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
 CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITA
 KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA)
 TELÉFONOS: 4227300 EXT: 1414
 E-MAIL: ypaeZc@corpoica.org.co

FIN DEL INFORME

Anexo 5: Resultado de análisis de laboratorio de agua tratada en filtro lento en arena.

INFORME N° 6-MI16 (15011) Daniel Cubillos

	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		Código: VC_F_116
			Versión: 2
	Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras		Fecha de vigencia: (01-02-2016)
LABORATORIO DE MICROBIOLOGIA			
1. Información del cliente			
Nombre y Apellido:	DANIEL CUBILLOS		
Cédula o NIT	11366512		
Dirección:	CLL 7 2-05 INT 6 CASA 5		
Dpto.	CUNDINAMARCA		
Municipio:	TOCAIMA		
Tel. fijo/Celular:	3214295583-8207359		
Análisis solicitado:	E. COLI Y COLIFORMES TOTALES		
			Número de solicitud 12
2. Información de la muestra			
Matriz:	AGUA		<i>Andrea Navarrete. (E6994)</i> Líder Unidad de Laboratorio de Microbiología
Presentación:	LIQUIDO		
Etiqueta:	NO INDICA		
Fecha de muestreo:	2016-02-15		
Fecha de recepción:	2016-03-15		
Fecha de análisis:	2016-03-17		
Fecha de reporte:	2016-03-30		
DETERMINACIÓN ANALÍTICA			
Código de laboratorio		Análisis químico y microbiológico	
	UNIDADES MÉTODOS IDENTIFICACIÓN	UFPC/100ml AOAC 2003.01	ppm AOAC
AM16-15011	PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADOS
	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	ppm	50
	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	ppm	60
	FOSFORO TOTAL	ppm	5
	SÓLIDOS TOTALES	ppm	40
	SÓLIDOS DISELTOS	ppm	20
	SÓLIDOS SUSPENDIDOS	ppm	21
	NITRÓGENO ORGÁNICO	ppm	100
	COLIFORMES TOTALES	NMP/100ml	MENOR A 10
	COLIFORMES FECALES	NMP/100ml	AUSENTE
Observaciones:			
Los resultados son válidos únicamente para la muestra en referencia. Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma. Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de CORPOICA.			
CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT. 800194500-3 CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATA KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA) TELÉFONOS: 4227300 EXT. 1414 E-MAIL: ypaeZc@corpoica.org.co			

FIN DEL INFORME


Anexo 6: Costos de implementación de los tratamientos implementados.

Filtro Lento en Arena (FLA)		Laguna de maduración	
Descripción	Precio en pesos mlcv	Descripción	Precio en pesos mlcv
Tanque de 500 L	140.000	Implementación de la laguna	90.000
Accesorios	6.300		
Grava	10.000		
Arena gruesa	15.000	Plástico negro	24.000
Arena Fina	15.000		
Bomba de 1 hp	150.000	Bomba de 1 hp	150.000
Plástico negro	24.000	Manguera negra de polietileno	50.000
manguera negra de polietileno	50.000		
Total	410.300	Total	314.000

Anexo 7: Análisis de suelos de la Finca el Jardín.

REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELO No. 511-2011

Página 1 de 1



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ

LABORATORIO DE SUELOS FACULTAD DE AGRONOMÍA

Remitente: Farid Medina
E-mail: jmedina@unadigital.com
Dirección: Cl 54F Sur 93C-42
Teléfono: 7340438
Ciudad: Bogotá D.C.

Finca: El Jardín
Propietario: Alcira Ortiz
Municipio: Tocaima
Dpto: Cundinamarca
Cultivo: Mango

Lote:
Recibido: 09/05/11
Reportado: 04/05/11
Recibo No.: 101250050

RESULTADOS

pH	CE dS/m	CO	N	Ca	K	Mg	Na	Al	CICE	CIC
		%		meq / 100g						
7,3	ns	1,14	0,10	32,6	0,41	5,62	0,16	0,00	38,8	33,6

na: no solicitado

P	S	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Ar	L	A	Textura
mg / kg							%			
58,0	ns	1,00	54,0	16,6	0,54	0,21	51	24	25	Ar

Los resultados corresponden únicamente a las muestras suministradas por el usuario y analizadas en el laboratorio

PARÁMETRO
pH
CE: Conductividad eléctrica
CO: Carbono orgánico oxidable
N: Nitrogeno total
Ca, K, Mg, Na: Bases intercambiables
CIC: Capacidad de intercambio catiónico
CICE: CIC Efectiva
Al: Acidez intercambiable
P: Fósforo disponible
S: Azufre disponible
Cu, Fe, Mn, Zn: Microelementos
B: Boro
Arilla (Ar), limo (L), arena (A)
Textura


MÉTODOS DE ANÁLISIS
Suspensión suelo:agua (relación peso:volumen 1:1)
Extracto de la pasta de saturación
Walkley-Black
Estimado a partir del CO (factor empleado: 0.0862)
Extracción con acetato de NH ₄ 1M pH 7
Desplazamiento del NH ₄ intercambiado con NaCl
Estimado por suma de bases y acidez intercambiables
Extracción con HCl 1M
Bray II
Extracción con fosfato monocalcico
Extracción con DTPA
Extracción con fosfato monocalcico
Reactivos, dispersión con Na-Hexametafosfato
Triángulo de clasificación textural USDA

VALORACIÓN
Potenciométrica
Conductimétrica
Colorimétrica
Abstracción Atómica
Volumétrica
Volumétrica
Colorimétrica
Turbidimétrica
Abstracción Atómica
Colorimétrica
Densimétrica

NIVELES GENERALES DE REFERENCIA

Elemento	Clima	Alto	Medio	Bajo
N	Frio	>0.50	0.25-0.50	<0.25
	Medio	>0.25	0.15-0.25	<0.15
	Cálida	>0.20	0.10-0.20	<0.10

Elemento	Alto	Medio	Bajo
P	>40	20-40	<20
K	>0.25	0.15-0.25	<0.15
Ca	>6	3,0-6,0	<3
Mg	>2.5	1.5-2.5	<1.5

Directora: 

RECOMENDACIÓN: El plan de fertilización es más eficiente si se consulta con el profesional de Asistencia Técnica de su localidad

Laboratorio de Aguas y Suelos, Facultad de Agronomía, Edificio 508 Cuarto Piso
Carreterada 316 5000 Extensiones 19000 ó 19040; Teléfono: 316 5488
Correo electrónico: pchenata@unad.edu.co
Bogotá, Colombia

Anexo 8: Cálculos de las formulas implementadas.

Coefficiente de dispersión de la laguna de maduración:

$$d = \frac{0184 [18 (1+2)]^{0,489} (1)^{1,511}}{(2)^{1,489}}$$

$$d = \mathbf{0,46}$$

Variabilidad en la remoción de coliformes en laguna de maduración:

$$N = \frac{2033 \text{ NMP}}{1 + 2,0 * 18}$$

$$N = \mathbf{54,94 \text{ NMP}}$$

Área superficial del filtro lento en arena

$$As = \frac{(260 \text{ L/día} * 1)}{(1 * 0,03 \text{ m/h})}$$

$$As = \frac{0,01083 \text{ m}^3/\text{h}}{0,03 \text{ m/h}}$$

$$As = \mathbf{0,361 \text{ m}^2}$$

Carga orgánica de laguna de maduración

$$Co = 255 \text{ mg DBO/ L} * 1368 \text{ L/h}$$

$$Co = 348,840 \text{ mg /h}$$

$$Co = \mathbf{8,4 \text{ Kg DBO/ día}}$$

Carga orgánica superficial de la laguna

$$Cs = \frac{8,4 \text{ kg DBO/día}}{2 \text{ m}^2}$$

$$Cs = 4,2 \text{ DBO/ m}^2/\text{ día}$$

Carga orgánica volumétrica de la laguna

$$Cv = \frac{8,4 \text{ kg DBO/día}}{2 \text{ m}^3}$$

$$Cv = 4,2 \text{ DBO/ m}^3/\text{ día}$$

Carga orgánica del filtro lento en arena

$$Co = 2,55 \text{ mg DBO/ L} * (260 \text{ L/día}) * (1 \text{ kg}/10^6 \text{ mg})$$

$$Co = 0.0663 \text{ Kg/ día}$$

Carga orgánica superficial

$$Cs = \frac{0,00663 \text{ kg/día}}{0,361 \text{ m}^2}$$

$$Cs = 0,01 \text{ kg/m}^2/\text{ día}$$