

**COSTOS DE INVERSIÓN INICIAL, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE
TRATAMIENTOS NATURALES DE AGUAS RESIDUALES PARA
PEQUEÑAS COMUNIDADES EN COLOMBIA.**



Por: José Manuel Patiño Gómez

Director: Jaime A. Lara Borrero

Proyecto de Grado

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C. 30 DE ENERO DE 2012**

A mi familia y en especial a caliche por el apoyo, también a las persona que de alguna forma colaboraron en esta investigación. A mi director.

Tabla de Contenido

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	9
3. OBJETIVOS	10
3.1. GENERAL	10
3.2. ESPECÍFICOS	10
4. MARCO CONCEPTUAL	11
4.1. AGUAS RESIDUALES (AR)	11
4.1.1. <i>Procedencia</i>	11
4.1.2. <i>Características</i>	11
4.1.2.1. Cantidad de AR	12
4.1.2.2. Parámetros de calidad de AR.....	12
4.1.3. <i>Concepto de habitante equivalente</i>	14
4.1.4. <i>Depuración de Aguas Residuales Urbanas (ARU)</i>	15
4.1.4.1. Necesidad de depuración de las ARU	15
4.1.4.2. Fundamentos básicos del tratamiento de las ARU	15
4.1.4.3. Recogida y conducción	15
4.1.4.4. Tratamiento.....	16
4.1.4.5. Línea de agua.....	16
❖ Pre tratamiento	16
❖ Tratamiento Primario	24
❖ Tratamiento Secundario	24
❖ Tratamiento Terciario.....	24
4.1.4.6. Línea de lodos.....	24
4.1.4.7. Evacuación.....	25
4.2. MARCO NORMATIVO	26
4.2.1. <i>Constitución Política de Colombia de 1991</i>	26
4.2.2. <i>Ley 99 de 1993 y Ley 1444 de 2011</i>	27
4.2.3. <i>Decreto 1594 DE 1984 y Decreto 3930 de 2010 “Usos del agua y residuos líquidos”</i>	29
4.2.4. <i>Resolución 1096 del 17 de Noviembre de 2000</i>	31
4.2.5. <i>Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura OMS</i>	32
4.3. SISTEMAS NATURALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	33
4.3.1. <i>Tanque Séptico</i>	33
4.3.1.1. Modelo general de diseño	35
4.3.1.2. Remoción de contaminantes	35
4.3.2. <i>Humedales</i>	36
4.3.2.1. La vegetación.....	37
4.3.2.2. Microorganismos.....	37
4.3.2.3. Animales	38
4.3.2.4. Mejoramiento del paisaje.....	38
4.3.2.5. Tipos de humedales.....	38
– Humedal de flujo libre (HFL).....	38
– Humedal de flujo Subsuperficial (HFS)	39
4.3.2.6. Modelo general de diseño	39
– Diseño Hidráulico HFL	41
– Diseño Hidráulico HFS	42
4.3.2.7. Remoción de DBO.....	43

4.3.2.8.	Remoción SST	44
4.3.2.9.	Remoción de Patógenos	44
4.3.3.	<i>Lagunas de estabilización</i>	44
4.3.3.1.	Microbiología	45
4.3.3.2.	Bacterias	45
4.3.3.3.	Fitoplancton	46
4.3.3.4.	Zooplancton	46
4.3.3.5.	Benthos	46
4.3.4.	<i>Radiación solar</i>	46
4.3.5.	<i>Temperatura</i>	47
4.3.6.	<i>Viento</i>	47
4.3.7.	<i>Evaporación y precipitación</i>	47
4.3.8.	<i>Tipos de Lagunas de estabilización</i>	47
4.3.8.1.	Lagunas anaerobias (LA)	47
4.3.8.2.	Modelo general de diseño (LA)	48
4.3.8.3.	Lagunas Facultativas (LF)	49
4.3.8.4.	Modelo general de diseño (LF)	50
4.3.8.5.	Lagunas de maduración (LM)	51
4.3.8.6.	Modelo general de diseño (LM)	51
4.4.	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (O&M) DE SISTEMAS NATURALES	54
4.4.1.	<i>Operación del Sistema de Tratamiento</i>	54
4.4.1.1.	Componente Sanitario	54
•	Medición de Caudal	54
•	Muestreo del Afluente y Efluente	55
•	Observación del Efluente	55
•	Muestreo y Evaluación de Lodos	55
•	Control de Carga	55
4.4.1.2.	Operaciones del Componente Hidráulico	55
•	Alcantarillado y Tubería de Interconexión	55
•	Control del Caudal de Entrada a la PTAR	56
•	Desvíos (By Pass). Pasos Directos	56
•	Rejillas	56
•	Canales Desarenadores	56
•	Mantenimiento	57
•	Extracción y Manejo de Lodos	57
4.5.	PISOS TÉRMICOS EN COLOMBIA	58
4.5.1.	<i>Piso térmico cálido</i>	58
4.5.2.	<i>Piso térmico templado o medio</i>	58
4.5.3.	<i>Piso térmico frío</i>	58
4.5.4.	<i>Piso térmico paramo</i>	58
4.5.5.	<i>Piso térmico glacial</i>	59
4.5.6.	<i>Temperatura</i>	59
4.5.7.	<i>Precipitación</i>	60
4.5.8.	<i>Evaporación</i>	60
4.6.	REGIONES NATURALES DE COLOMBIA	61
4.7.	COSTOS DE TIERRA EN COLOMBIA	62
5.	METODOLOGÍA	63

5.1.	SELECCIÓN DE TRENES	63
5.2.	SIMULACIÓN.....	66
5.2.1.	<i>Generación valores para las variables y sus límites</i>	<i>67</i>
5.2.2.	<i>Dimensionamiento y cantidades de obra tren de tratamiento.....</i>	<i>68</i>
5.2.2.1.	Dimensionamiento	68
5.2.2.2.	Cantidades de obra.....	70
5.2.3.	<i>Calculo de costos de inversión inicial O, & M.....</i>	<i>82</i>
5.2.3.1.	Costos de inversión inicial	82
5.2.3.2.	Costos de O&M	87
-	Costos directos de personal	87
-	Otros costos directos (Materiales y actividades O&M)	89
-	Costos indirectos	90
5.2.4.	<i>Definición del número de iteraciones.....</i>	<i>91</i>
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	93
6.1.	ANÁLISIS GENERALES.....	93
6.2.	ANÁLISIS ESPECÍFICOS.....	102
6.2.1.	<i>Categorías Costo Inversión Inicial</i>	<i>102</i>
6.2.2.	<i>Categorías Costos O&M</i>	<i>109</i>
6.3.	ANÁLISIS DETALLADOS.....	115
6.4.	HERRAMIENTA DE SOPORTE PARA LA TOMA DE DECISIONES	126
7.	CONCLUSIONES.....	130
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
10.	ANEXOS	135

Tabla de Figuras

Figura 1. Composición de las AR domesticas (% en peso)	13
Figura 2. Detalles de las cotas y dimensiones del medidor Parshall	20
Figura 3. Corte tanque séptico de dos compartimientos	34
Figura 4. Tipos de plantas emergentes más comunes en los humedales	36
Figura 5. Tipos de plantas en humedales sembrados.....	37
Figura 6. Elementos básicos HFL.....	38
Figura 7. Elementos básicos HFS.....	39
Figura 8. Ciclo trófico en los sistemas de lagunaje.....	45
Figura 9. Esquema pisos térmicos en Colombia	58
Figura 10. Relación de la temperatura con la elevación.....	59
Figura 11. Temperaturas aproximadas en diferente niveles altitudinales	59
Figura 12. Regiones Naturales de Colombia	61
Figura 13. Esquema Tren 0	63
Figura 14. Esquema Tren 1	64
Figura 15. Esquema Tren 2	64
Figura 16. Esquema Tren 3	64
Figura 17. Esquema Tren 4	64
Figura 18. Esquema Tren 5	64
Figura 19. Esquema Tren 6	64
Figura 20. Esquema Tren 7	65
Figura 21. Esquema Tren 8	65
Figura 22. Esquema Tren 9	65
Figura 23. Esquema Tren 10	65
Figura 24. Esquema Tren 11	65
Figura 25. Esquema Tren 12	65
Figura 26. Esquema Tren 13	66
Figura 27. Esquema Tren 14	66
Figura 28. Diagrama de flujo programa de la simulación	67
Figura 29. Esquema dimensionamiento tratamiento preliminar (Rejillas, desarenador y canaleta Parshall)	75
Figura 30. Esquema dimensionamiento Tanque séptico.....	76
Figura 31. Esquema dimensionamiento lagunas.....	77
Figura 32. Esquema dimensionamiento HFL.....	78
Figura 33. Esquema dimensionamiento HFS.....	79
Figura 34. Distribución “tres bolillos” vegetación humedales.....	80
Figura 35. Esquema básico planta de tratamiento.....	81
Figura 36. Mapa Regiones y municipios con puntos analizados.....	84
Figura 37. Primer pantallazo ingreso variables entrada herramienta de soporte	126
Figura 38. Segundo pantallazo calculo caudal y asignación n talud herramienta de soporte	127
Figura 39. Opción de editar los análisis de precios unitarios herramienta de soporte	127
Figura 40. Gráficos resultados sin desinfección herramienta de soporte	128
Figura 41. Gráficos resultados con desinfección herramienta de soporte	129

Tabla de Gráficos

Gráfico 1. Variación desviación estándar suma total costos trenes vs. Numero de iteraciones (0 – 1,000,000)	91
Gráfico 2. Variación desviación estándar suma total costos trenes vs. Numero de iteraciones (0-50,000)	92
Gráfico 3. Costo inversión inicial trenes de tratamiento sin desinfección	95
Gráfico 4. Costo O&M 20 años trenes de tratamiento sin desinfección	96
Gráfico 5. Costo inversión inicial trenes de tratamiento con desinfección	98
Gráfico 6. Costo O&M 20 años trenes de tratamiento con desinfección	99
Gráfico 7. Mediana simulación Costos inversión inicial, O&M Trenes de tratamiento (Sin desinfección)	100
Gráfico 8. Mediana simulación Costos inversión inicial, O&M Trenes de tratamiento (Con desinfección)	101
Gráfico 9. Costos directos construcción trenes de tratamiento sin desinfección	103
Gráfico 10. Costos terreno mínimo requerido trenes de tratamiento sin desinfección	104
Gráfico 11. Costos directos construcción trenes de tratamiento con desinfección	105
Gráfico 12. Costos terreno mínimo requerido trenes de tratamiento con desinfección	106
Gráfico 13. Mediana simulación categorías costos inversión inicial trenes de tratamiento (Sin desinfección)	107
Gráfico 14. Mediana simulación categorías costos inversión inicial trenes de tratamiento (Con desinfección) ...	108
Gráfico 15. Costo total por año O&M trenes de tratamiento sin desinfección	109
Gráfico 16. Costo total por año O&M trenes de tratamiento con desinfección	110
Gráfico 17. Categorías Costos O&M por año (Sin desinfección)	111
Gráfico 18. Estructura de costos categorías O&M por año (Sin desinfección)	112
Gráfico 19. Categorías Costos O&M por año (Con desinfección)	113
Gráfico 20. Estructura de costos categorías O&M por año (Con desinfección)	114
Gráfico 21. Estructura de costos capítulos actividades de construcción (Sin desinfección)	115
Gráfico 22. Estructura de costos capítulos costos construcción (Con desinfección)	116
Gráfico 23. Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores medios variables de entrada	118
Gráfico 24. Detalle Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores medios variables de entrada	119
Gráfico 25. Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (con desinfección), con valores medios variables de entrada	120
Gráfico 26. Detalle Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (con desinfección), con valores medios variables de entrada	121
Gráfico 27. Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores altos variables de entrada	122
Gráfico 28. Detalle Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores altos variables de entrada	123
Gráfico 29. Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores bajos variables de entrada	124
Gráfico 30. Detalle Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores bajos variables de entrada	125

Tabla de Anexos

Anexo 1. CD Scripts algoritmo simulación en php, script sql creación estructura Base de datos mysql y archivos ejecutables herramienta de soporte	135
Anexo 2. Resumen cotizaciones materiales	136
Anexo 3. Análisis Mano de obra basado en CONSTRUDATA	137
Anexo 4. Análisis Mano de obra basado en información suministrada por Empresa de ingeniería # 2.	138
Anexo 5. Mano de obra basado en información suministrada por Empresa de ingeniería # 3.	139
Anexo 6. Análisis de precios unitarios Región Andina y porcentaje de variación	140
Anexo 7. Análisis de precios unitarios Región Caribe y porcentaje de variación	141
Anexo 8. Análisis de precios unitarios Región Orinoquía y porcentaje de variación	142
Anexo 9. Análisis de precios unitarios Región Pacífica y porcentaje de variación	143
Anexo 10. Análisis de precios unitarios Región Amazonía y porcentaje de variación	144
Anexo 11. Resumen Cotización Materiales, herramientas e insumos O&M	145
Anexo 12. Costo Paquetes de ensayos	145
Anexo 13. Regresiones Costos personal y Costos indirectos para todos los trenes de tratamiento	146
Anexo 14. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 0.....	146
Anexo 15. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 1.....	146
Anexo 16. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 2.....	147
Anexo 17. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 3.....	147
Anexo 18. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 4.....	147
Anexo 19. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 5.....	147
Anexo 20. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 6 y Tren 7	148
Anexo 21. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 8.....	148
Anexo 22. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 9.....	148
Anexo 23. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 10.....	148
Anexo 24. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 11.....	149
Anexo 25. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 12.....	149
Anexo 26. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 13 y Tren 14	149

2. Antecedentes y Justificación

Colombia es un país que se ha caracterizado por ser muy rico hídricamente (Marín 2003), pero la tala indiscriminada de árboles, el cambio climático, la contaminación ambiental, entre otras ha afectado mucho el recurso Colombiano. Según la Unesco (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) Colombia ha descendido varios lugares en los últimos años en la lista de países que manejan sus recursos hídricos de manera sostenible. Esto significa que el manejo del recurso no es sostenible poniendo en riesgo los ecosistemas, la salud pública y además la disponibilidad para las generaciones futuras (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales, IDEAM 2005).

Como el problema del recurso hídrico colombiano es básicamente la pérdida de la calidad del agua, la mayoría de propuestas ambientales futuras deberían ser encausadas a recuperar las fuentes hídricas contaminadas y crear una política que las proteja y las utilice de forma racional y sostenible.

En América Latina, el porcentaje de la población de ciudades pequeñas (menos de 100.000 habitantes) que cuentan con tratamiento de aguas residuales es del 61.3%, estando Colombia por debajo de este promedio alcanzando sólo el 23% (IDRC - OPS/HEP/CEPIS 2004). De acuerdo con cifras del Vice ministerio de Agua y Saneamiento Básico, Colombia en el 2008 solo trataba el 9% de las aguas residuales debido a que más del 50% de las plantas construidas no funcionaban adecuadamente (Guerrero 2010). Algunos de los problemas relacionados con el mal funcionamiento de los sistemas de tratamiento son: las tecnologías empleadas no siguen una secuencia lógica de tratamiento, muchas plantas se encuentra incompletas, existe muy poco mantenimiento y control de los procesos que se desarrollan en las plantas y/o solo existen recomendación de los expertos en tecnologías familiares (Guerrero 2010). En este orden de ideas existe una necesidad de algún tipo de herramienta de soporte para la toma de decisiones relacionada con la tecnología más eficiente y económica aplicada a las características del país, ya que como se sabe los recursos de comunidades pequeñas en Colombia son escasos y una mala elección de tecnología tendría un impacto importante en el presupuesto de la población. Esto ayudaría mucho a conocer en la etapa de factibilidad de un proyecto la magnitud de los costos iniciales de inversión y así adquirir la tecnología que más se adapte al esquema de financiación y a la necesidad de la población.

3. Objetivos

3.1. General

- Realizar un análisis comparativo de costos de inversión inicial, O & M para sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales domésticas para pequeñas comunidades (menores a 30.000 hab.) en Colombia.

3.2. Específicos

- Estimar los costos de inversión inicial, O & M para todas las diferentes zonas del país.
- Desarrollar un conjunto de herramientas (ecuaciones, gráficas y tablas) de soporte para estimar los costos de inversión inicial, O & M de sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas para pequeñas comunidades.
- Identificar cuáles son las variables de mayor influencia en los costos de inversión inicial, O & M de sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas para pequeñas comunidades.

4. Marco Conceptual

Se considera de vital importancia, para alcanzar los objetivos propuestos conocer a fondo todo lo referente a aguas residuales generadas por pequeñas comunidades, la normatividad colombiana enmarcada dentro del cuidado del medio ambiente y el uso sostenible del recurso hídrico, los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales domésticas, los rangos entre los que varían las diferentes variables climatológicas en Colombia y los costos de inversión, operación y mantenimiento de los sistemas anteriormente mencionados.

4.1. Aguas Residuales (AR)

Las AR pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido usadas en diferentes actividades tanto domésticas, industriales como comerciales, las cuales son recogidas y conducidas por la red de alcantarillado a un punto determinado (Mara 1976). Según su origen, por la combinación de líquidos y sólidos provenientes de residencias, oficinas, edificios comerciales e institucionales, industrias, actividades agrícolas, aguas subterráneas o de precipitación que pueden terminar eventualmente en el agua residual. (Rolim 2000)

4.1.1. Procedencia

Las AR de acuerdo a su procedencia pueden clasificarse como:

- AR Domésticas: Son aquellas utilizadas con fines higiénicos, como lo son las aguas de cocina (sólidos, materia orgánica, grasas, sales, etc.), aguas de lavadoras (sustancias tensoactivas, nutrientes, etc.), aguas de baño (sustancias tensoactivas, contaminantes prioritarios, etc.) y aguas negras (procedentes del metabolismo humano: sólidos, materia orgánica, nutrientes, sales, organismos patógenos, entre otros). También pueden ser originadas en establecimientos comerciales, públicos y similares.
- AR industriales: son residuos líquidos generados en los procesos industriales. La composición y características de estas aguas depende del tipo de industria.
- Infiltración y caudal adicionales: Las aguas subterráneas penetran en el sistema de alcantarillado a través de empalmes de las tuberías, paredes defectuosas, pozos de inspección y limpieza, etc.
- Pluvial: En la mayoría de los casos las pequeñas poblaciones no cuentan con un sistema de alcantarillado separado, y por esta razón se caracterizan por hacer aportes intermitentes al caudal total de agua residuales y arrastrar contaminantes (arenas, metales, tierra, hojas, etc.).

Sustancias tensoactivas: moléculas orgánicas que poseen la propiedad de formar espuma en el cuerpo receptor o en la planta de tratamiento. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA) 2006) (Rolim 2000)

4.1.2. Características

Cada Agua residual urbana es única en sus características, pues estas son función del tamaño de la población, del sistema de alcantarillado empleado, del grado de industrialización y de la incidencia de la pluviometría (CENTA 2006). Para estas características pueden establecerse

unos rangos de variación habituales basados en la literatura como se muestra más adelante en los parámetros de calidad del agua.

La temperatura de las AR generalmente es un poco mayor a la temperatura del aire, con excepción de los días más calientes por los vertidos industriales y los procesos microbiológicos que allí se llevan a cabo.

Estas características son determinadas por medio de mediciones locales de caudal y tomas de muestras locales de las aguas residuales. Para hacer uso de estos valores en el dimensionamiento se hace necesario un análisis e interpretación de los resultados obtenidos (Rolim 2000).

4.1.2.1. Cantidad de AR

La cantidad de AR que genera una población es directamente proporcional al consumo de agua de abastecimiento, es denominado coeficiente de retorno "C". Este consumo viene relacionado con el grado de desarrollo económico y social, puesto que un mayor desarrollo trae consigo un mayor y más diverso uso del agua en las actividades humana. Los principales factores que influyen en la cantidad de aguas residuales generadas por una población son:

- El consumo de agua de abastecimiento.
- La pluviometría (depende del tipo de alcantarillado)
- Las pérdidas, que pueden ser por fugas en la red o por qué parte de las aguas consumidas no llegan a la red (ej. Riego de jardines)
- Las ganancias, por infiltración en la red o conexiones erradas a la red.

Por los factores anteriormente mencionados, el caudal de AR oscila durante el año, cambiando de un día a otro y fluctuando de una hora a otra. La variación de este caudal es un fiel reflejo de las actividades humana durante el día, puesto que durante la noche y las primeras horas del día los consumos de agua son mínimos y por ende los de aguas residuales también. Mientras en la media mañana se presenta el primer caudal pico del día, y luego terminando la tarde se presenta un segundo caudal elevado (CENTA 2006).

4.1.2.2. Parámetros de calidad de AR

Los principales contaminantes de las AR son:

- Objetos gruesos: trozos de madera, trapos, plásticos, etc. que son arrojados a la red de alcantarillado.
- Arenas: bajo esta denominación se engloban las arenas, gravas y las partículas más o menos grandes de origen mineral y orgánico.
- Grasas y aceites: procedentes de actividades tanto domesticas como industrial.
- Sólidos en suspensión: partículas de pequeño tamaño y de naturaleza variada. Dentro de estos se encuentran los sólidos sedimentables por su propio peso y los no sedimentables.
- Sustancias con requerimiento de oxígeno: compuestos orgánicos e inorgánicos que se oxidan fácilmente, lo que provoca un consumo del oxígeno disuelto en el medio al que se vierten. Para su caracterización los parámetros usados son:

- Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO_5): Cantidad de oxígeno (mg/l), necesaria para oxidar biológicamente los componentes de las aguas residuales.
- Demanda química de oxígeno a los 5 días (DQO): Cantidad de oxígeno (mg/l) necesaria para oxidar los componentes del agua recurriendo a reacciones químicas.
- La relación DBO_5/DQO indica la biodegradabilidad de las AR:
- $DBO_5/DQO > 0,4 \rightarrow$ A.R. Muy biodegradables
- $DBO_5/DQO 0,2 - 0,4 \rightarrow$ A.R. biodegradables
- $DBO_5/DQO < 0,2 \rightarrow$ A.R. Poco biodegradables
- Nutrientes (Nitrógeno, Fósforo, etc.): su presencia en las aguas es debida principalmente a detergentes y fertilizantes. Igualmente, excretas humanas que aportan nutrientes orgánicos. El nitrógeno se presenta en forma de nitrógeno orgánico, amoniaco, nitratos y nitritos. El fosforo en orgánico y poli fosfatos.
- Agentes patógenos: organismos (bacterias, protozoos, helmintos y virus), presentes en mayor o menor cantidad en las AR y que pueden producir o transmitir enfermedades. Al ser muy difícil su aislamiento se emplean, habitualmente, los coliformes como organismo indicador.
- Contaminantes prioritarios: generados por los hábitos de consumo de la sociedad actual. Son sustancias provenientes de los productos de aseo personal, farmacéuticos, etc. (CENTA 2006).

La composición de las AR domesticas en porcentaje del peso se muestra en la Figura 1.

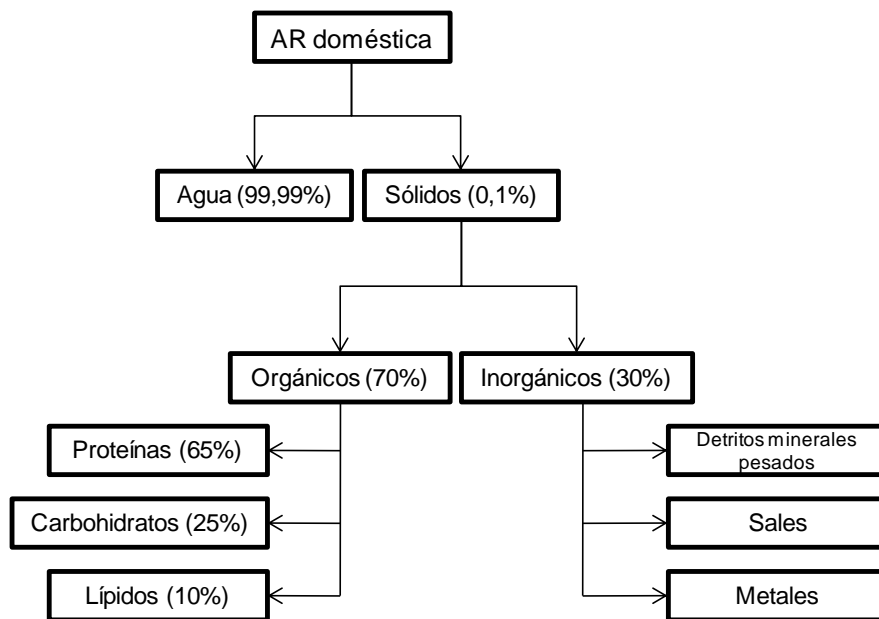


Figura 1. Composición de las AR domesticas (% en peso)
Fuente: (Tebbutt 1977)

Datos típicos de los constituyentes encontrados en las AR domésticas se muestran en la Tabla 1.

Componente	Unidad	Concentración		
		Fuerte	Media	Diluida
Sólidos totales	mg/l	1.200	720	350
Sólidos disueltos totales	mg/l	850	500	250
Sólidos disueltos fijos	mg/l	525	300	145
Sólidos disueltos volátiles	mg/l	325	200	105
Sólidos suspendidos	mg/l	350	220	100
Sólidos suspendidos fijos	mg/l	75	55	20
Sólidos suspendidos volátiles	mg/l	275	165	80
Sólidos sedimentables	mg/l	20	10	5
DBO ₅	mg/l	400	220	110
Carbono orgánico total	mg/l	290	160	80
DQO	mg/l	1.000	500	250
Nitrógeno total	mg/l	85	40	20
Nitrógeno orgánico	mg/l	35	15	8
Nitrógeno amoniacal	mg/l	50	25	12
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo total	mg/l	15	8	4
Fósforo orgánico	mg/l	5	3	1
Fósforo inorgánico	mg/l	10	5	3
Cloruros*	mg/l	100	50	30
Sulfatos*	mg/l	50	30	20
Alcalinidad en CaCO ₃	mg/l	200	100	50
Aceites y grasas	mg/l	150	100	50
Coliformes totales	NMP/ 100ml	10 ⁷ a 10 ⁹	10 ⁷ a 10 ⁸	10 ⁶ a 10 ⁷
Compuestos orgánicos volátiles	µg/l	>400	100 a 400	<100

* Los valores pueden aumentar por la cantidad presente de aguas de abastecimiento

Tabla 1. Rangos típicos de la composición del AR doméstica.
Fuente: (Metcalf & Eddy 1991)

4.1.3. Concepto de habitante equivalente

El patrón adoptado para la medición de la contaminación biodegradable presente en las aguas residuales es el habitante equivalente. Definido por la Directiva 91/271/CEE de España como “la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO₅) de 60g de oxígeno por día”.

Conocido el caudal de aguas residuales (Q) generado por una aglomeración urbana y su valor de DBO₅, la población equivalente se determina mediante la expresión:

$$h. e. = \frac{Q \left(\frac{m^3}{d} \right) \times DBO_5 \left(\frac{mg}{l} \right)}{DBO \text{ per cápita } g \frac{DBO_5}{hab} d}$$

En aquellas aglomeraciones en las que los aportes de vertidos biodegradables distintos a los de procedencia doméstica sean nulos, o de escasa importancia, la población equivalente será muy similar a la población de hecho de la aglomeración (CENTA 2006).

La DBO per cápita muchas veces es utilizada sin cuestionamientos y sin verificación de los valores locales de una determinada población. La Tabla 2 presenta la variación de la contribución per cápita de la DBO.

País	DBO (g/hab.d)
Zambia	36
Kenia	23
Sudeste de Asia	43
India	30-45
Francia	24-34
Gran Bretaña	50-60
Estados Unidos	45-80
Holanda	54
Alemania	54
Brasil	39-54

Tabla 2. Variación de la contribución per cápita de DBO
Fuente: (Mara 1976)

4.1.4. Depuración de Aguas Residuales Urbanas (ARU)

4.1.4.1. Necesidad de depuración de las ARU

Verter aguas residuales urbanas sin depurar sobre los cuerpos receptores genera una serie de efectos negativos. Estos son:

- Aparición de fangos y flotantes: la fracción sedimentable de los sólidos en suspensión presentes en las ARU origina sedimentos en el fondo de los cauces, mientras que, la fracción flotante da lugar a la acumulación de grandes cantidades de sólidos en la superficie y/o en las orillas de los cauces receptores. Esto genera un desagradable impacto visual y además la materia orgánica puede provocar agotamiento de oxígeno disuelto y desprendimiento de malos olores.
- Agotamiento del contenido de oxígeno presente en las aguas: Por la oxidación bacteriana de la materia orgánica el oxígeno disuelto desciende por debajo de los valores mínimos necesarios para el desarrollo de vida acuática. Además en el proceso de degradación por vía anaerobia generarán olores desagradables.
- Aportes excesivos de nutrientes: El exceso de nutrientes en los cauces genera el fenómeno conocido como eutrofización donde especialmente de los compuestos de nitrógeno y fósforo, que provoca un crecimiento acelerado de algas y especies vegetales superiores. Impidiendo esto el empleo de estas aguas en usos agrícolas, domésticos e industriales.
- Daños a la salud pública: La presencia de organismos patógenos para el ser humano (virus, bacterias, protozoos y helmintos) puede propagar enfermedades como el tífus, el cólera, la disentería y la hepatitis A (CENTA 2006).

El tratamiento de aguas residuales disminuye los contaminantes presentes en las aguas residuales, emitiendo efluentes que pueden ser asimilados de forma natural por los cuerpos receptores.

4.1.4.2. Fundamentos básicos del tratamiento de las ARU

Las instalaciones para la depuración de las ARU constan de tres elementos principales:

4.1.4.3. Recogida y conducción

La recogida y conducción de las ARU se realiza a través de una red de alcantarillado y colectores. Dependiendo de la topografía, las aguas escurrirán por gravedad o será necesario

recurrir a bombeo. Con el objetivo de que la estación depuradora no le ingrese más del caudal proyectado se instala aliviaderos, que permiten derivar excesos de caudal. Esta situación tiene lugar principalmente en periodos de fuertes lluvias (CENTA 2006).

De acuerdo con el tipo de aguas que colectan, los sistemas de alcantarillado pueden clasificarse en:

- Sistema combinado: Las aguas pluviales y residuales son transportadas en un mismo sistema.
- Sistema separado: Las aguas pluviales y las residuales son transportadas en sistemas diferentes (tuberías). (Rolim 2000)

Otro aspecto importante que se deben tener en cuenta son los by-pass que se deben hacer por si se presentan problemas de funcionamiento. Estos by-pass son el general que se instala a la entrada de los vertidos. Los by-pass parciales detrás de cada etapa de tratamiento descargan en la misma línea del by-pass general llegando a la salida final de los efluentes depurados (CENTA 2006).

4.1.4.4. Tratamiento

El tratamiento en una estación depuradora consiste de un conjunto de operaciones físicas, biológicas y químicas, que persiguen eliminar la mayor cantidad de contaminantes antes de su vertido, de forma que los niveles de contaminación que queden en los efluentes cumplan las normativas existentes y puedan ser asimilados de forma natural por los cuerpos receptores.

En la depuración de aguas residuales se conocen dos líneas de tratamiento:

4.1.4.5. Línea de agua

Conjunto de procesos o tratamientos que permiten reducir los contaminantes presentes en las aguas residuales. Estas etapas se muestran en la Tabla 3.

	Pretratamiento	Tratamiento Primario	Tratamiento Secundario	Tratamiento Terciario	
ARU	Objeto: eliminación de objetos gruesos, arenas y grasas.	Objeto: eliminación de materia sedimentable y flotante	Objeto: eliminación de materia orgánica disuelta o coloidal	Objeto: eliminación de sólidos en suspensión, materia orgánica residual, nutrientes (N y P) y patógenos	efluente
	Separación grandes sólidos: Desbaste Tamizado Desarenado Desengrasado	Decantación Primaria	Decantación secundaria y Degradación bacteriana	Desinfección y Eliminación N y P	

Tabla 3. Etapas de la línea de agua en el tratamiento de las ARU
Fuente: (Rolim 2000)

❖ Pre tratamiento

Son una serie de operaciones físicas y mecánicas, que como se muestra en Tabla 3 tiene por objetivo separar del agua residual la mayor cantidad posible de materiales, que, por su naturaleza o tamaño, pueden dar lugar a problemas en las etapas posteriores del tratamiento. El diseño adecuado y mantenimiento programado de esta etapa es de importancia, ya que

pueden presentarse problemas de obstrucciones de tubería, válvulas y bombas, desgaste de quipos, formación de costras, etc. Las operaciones de esta etapa se describen a continuación:

- Separación de grandes sólidos: Cuando las ARU presentan sólidos de gran tamaño, o una excesiva cantidad de arenas, se instala un pozo de gruesos o estructura similar que permita la remoción de estos. Los residuos extraídos deben ser transportados a un vertedero.
- Desbaste: Se puede hacer mediante rejas, que de acuerdo a su separación de barrotes se clasifican de la siguiente manera:
 - Desbaste de gruesos: el paso libre entre los barrotes es de 50 a 100 mm
 - Desbaste de finos: el paso libre entre los barrotes es de 10 a 25 mm

Estas pueden ser rectas o curvas y dependiendo de la forma en la que se realiza la limpieza se distinguen en manual o automática.

- Tamizado: Remueve sólidos en suspensión, mediante la filtración a través de un soporte delgado dotado de ranuras de paso.
- Desarenado: tiene por objetivo la eliminación de materias pesadas de tamaño superior a 0.2 mm, para evitar que sedimenten en canales y conducción. Los desarenadores pueden ser de flujo variable o flujo constante.
- Desengrasado: se eliminan las grasas y demás materias flotantes más ligeras que el agua.
- Medición de caudal: Medir los caudales de agua son importantes al poder determinar los caudales de agua a tratar y los realmente tratados, lo que permite ajustar condiciones operativas de las distintas etapas del tratamiento y obtener el coste del tratamiento por unidad de volumen tratado. Los medidores deben ser ubicados en la última etapa del pretratamiento para minimizar problemas de obstrucciones, desgastes, formación de depósitos de grasas, etc. (CENTA 2006)

Según Rolim (2000), el tratamiento preliminar posee como componentes principales rejillas de barras, desarenador y medidor de canaleta Parshall. A continuación se describe la forma de dimensionarlos:

- Rejillas de barras

Son dispositivos formados por barras metálicas, paralelas, del mismo espesor e igualmente espaciadas en cargadas de hacer el desbaste. Remueven sólidos gruesos en suspensión, así como cuerpos flotantes, como estopas, papel, madera, plástico, entre otros.

Dependiendo del tipo de material que se quiere retener y de los equipos a proteger, se escoge el espaciamiento útil entre las barras. Pueden clasificarse así:

- Rejillas gruesas: se instalan aguas arriba de las bombas de grandes dimensiones, turbinas, etc., y casi siempre preceden rejillas comunes.
- Rejillas medianas: con menor espacio entre barras (por lo general 25 mm); se usan comúnmente en plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Rejillas finas: se emplean cuando están bien determinadas las características de las aguas negras a tratar.

Las barras son casi siempre de sección rectangular; sus espacios se presentan en la Tabla 4.

Tipo	Espaciamiento	
	Pulgadas	Milímetros
Gruesa	Por encima de 1 1/2	40 a 100
Media	3/4 a 1 1/2	20 a 40
Fina	3/8 a 3/4	10 a 20

Tabla 4. Espaciamiento entre rejillas.
Fuente: (Rolim 2000)

La variación de las dimensiones de la sección transversal de las barras se muestra en la Tabla 5.

Tipo de rejilla	Sección	
	mm x mm	Pulg
Gruesa	10 x 50	3/8 x 2
Gruesa	10 x 60	3/8 x 2 1/2
Gruesa	13 x 40	1/2 x 1 1/2
Gruesa	13 x 50	1/2 x 2
Media	8 x 50	5/16 x 2
Media	10 x 40	3/8 x 1 1/2
Media	10 x 50	3/8 x 2
Fina	6 x 40	1/4 x 1 1/2
Fina	8 x 40	5/16 x 1 1/2
Fina	10 x 40	3/8 x 1 1/2

Tabla 5. Sección transversal rectangular de las barras
Fuente: (Rolim 2000)

De acuerdo con el tipo de limpieza, las rejillas pueden ser clasificadas de la siguiente forma:

- Limpieza manual: 45° a 60° con la horizontal.
- Limpieza mecánica: 60° a 90° con la horizontal (más usual de 75° a 85°)

- Desarenadores

Son unidades destinadas a retener la arena y otros residuos minerales inertes y pesados que se encuentran en las aguas residuales (escombros, guijarros, partículas de metal, carbón, etc.).

Una partícula suspendida se considera removida si su velocidad de sedimentación es suficiente para alcanzar el fondo del desarenador y si la velocidad horizontal del líquido es insuficiente para remover la partícula sedimentada por arrastre.

La velocidad recomendable es de 0,30 m/s. Velocidades inferiores a 0,15 m/s causan la deposición de cantidades relativamente mucho más grandes de materia orgánica (depósito de lodo) y velocidades superiores a 0,40 m/s permiten el paso de partículas de arena que no convienen a las demás unidades de tratamiento. Por tal razón, debe procurarse mantener una velocidad de escurrimiento alrededor de 0,30 m/s, con tolerancia de más o menos 20%.

En construcciones muy pequeñas, puede dimensionarse un único desarenador, con la condición que se dimensione un canal de derivación. En instalaciones mayores se proyectan

dos unidades en paralelo, de tal manera que siempre haya una disponible, para efectos de limpieza y reparación.

- Canaleta Parshall

El medidor Parshall está incluido entre los medidores de régimen de flujo crítico. Consiste en una estructura de paredes verticales, constituida a partir de la entrada por un trecho convergente con el fondo, en los sentidos longitudinales y transversales, de un trecho contraído y de una sección divergente en pendiente.

El ancho nominal W , es el número con que convencionalmente se identifican. Este es una medida próxima al valor de la garganta contraída. Este valor es escogido de la Tabla 6 en función del caudal máximo y mínimo, verificando cual es el menor medidor aplicable.

Capacidad (l/s)		W	
Mínima	Máxima	(Pulg) (Pies)	(cm)
0,85	53,8	3"	7,6
1,52	110,4	6"	15,2
2,55	251,9	9"	22,9
3,11	455,6	1'	30,5
4,25	696,2	1 1/2'	45,7
11,89	936,7	2'	61,0
17,26	1.426,3	3'	91,5
36,79	1.921,5	4'	122,0
62,80	2.422	5'	152,5
74,40	2.929	6'	183,0
115,40	3.440	7'	213,5
130,70	3.950	8'	244,0
200,00	5.660	10'	305,0

Tabla 6. Medidor Parshall con escurrimiento libre: límites de aplicación.
Fuente: (Rolim 2000)

En la Tabla 7 se muestran los valores del exponente n y del coeficiente K , para el dimensionamiento.

W		n	K	
(Pulg/pies)	(m)		Unidades métricas	Unidades americanas
3"	0,076	1,547	0,176	0,0992
6"	0,152	1,580	0,381	2,06
9"	0,229	1,530	0,535	3,07
1'	0,305	1,522	0,690	4,00
1 1/2'	0,457	1,538	1,054	6,00
2'	0,610	1,550	1,426	8,00
3'	0,915	1,556	2,182	12,00
4'	1,220	1,578	2,935	16,00
5'	1,525	1,587	3,728	20,00
6'	1,830	1,595	4,515	24,00
7'	2,135	1,601	5,306	28,00
8'	2,440	1,606	6,101	32,00

Tabla 7. Medidor Parshall: valores del exponente n y el coeficiente K .
Fuente: (Rolim 2000)

Las dimensiones estándar de medidores Parshall, en centímetros se muestran en la Tabla 8 en función del ancho de garganta W. Los detalles de las dimensiones y cotas en planta y perfil son ilustradas en la Figura 2.

W		A	B	C	D	E	F	G	K	N
(Pulg)	(cm)									
1"	2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	38,1	7,6	20,3	1,9	2,9
3"	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	45,7	15,2	30,5	2,5	5,7
6"	15,2	62,1	61,0	30,5	40,3	53,3	30,5	45,7	3,8	11,4
9"	22,9	88,0	86,4	45,7	57,5	61,0	45,7	61,0	6,9	17,1
1'	30,5	137,1	134,4	61,0	84,5	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
1 1/2'	45,7	144,8	142,0	76,2	102,6	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
2'	61,0	152,3	149,3	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
3'	91,5	167,7	164,2	122,0	157,2	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
4'	122,0	182,8	179,2	152,5	193,8	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
5'	152,5	198,0	194,1	183,0	230,3	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
6'	183,0	213,3	209,1	213,5	266,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
7'	213,5	228,6	224,0	244,0	303,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
8'	244,0	244,0	239,0	274,5	340,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
10'	305,0	274,5	260,8	366,0	475,9	122,0	91,5	122,0	14,2	34,3

Tabla 8. Dimensiones estándar de medidores Parshall, en centímetros
Fuente: (Rolim 2000)

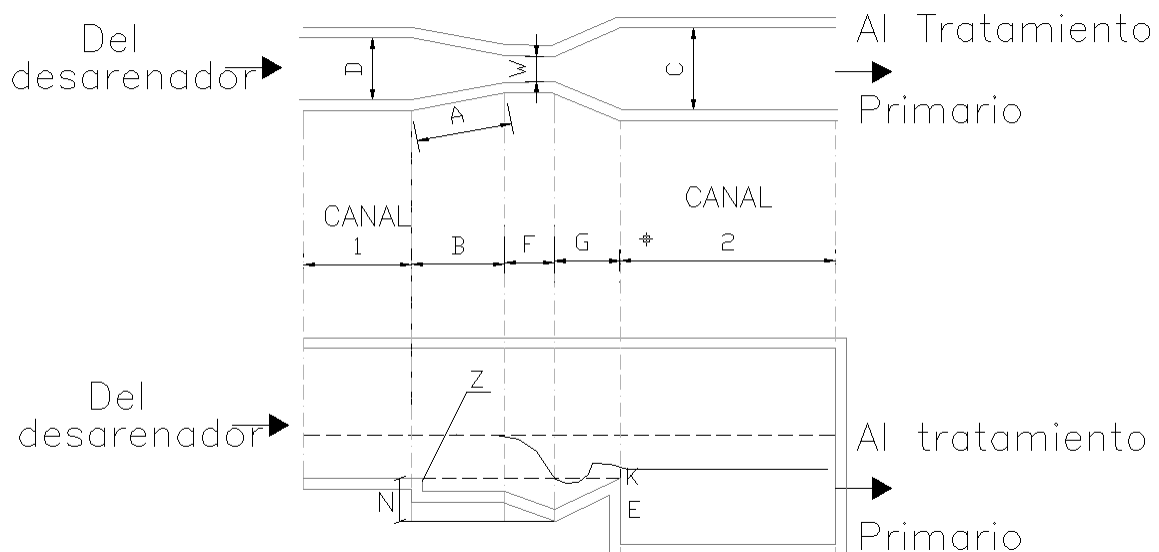


Figura 2. Detalles de las cotas y dimensiones del medidor Parshall.
Fuente: (Rolim 2000)

Dimensionamiento tratamiento preliminar

Canaleta Parshall

Para el dimensionamiento del tratamiento preliminar se deben tener en cuenta el caudal máximo, medio y mínimo y verificar el adecuado funcionamiento para los tres.

El diseño comienza por el final con la canaleta Parshall, utilizando el caudal máximo se entra a la Tabla 6y se verifica el menor medidor aplicable. La profundidad de la lámina de agua deberá estimarse para los tres caudales. La ecuación general está dada por:

$$H = \left(\frac{Q}{K}\right)^{1/n}$$

Dónde:

K y n: se encuentran en la Tabla 7 en función del ancho de garganta W, anteriormente encontrado.

H: Profundidad de la lámina de agua (m)

El resalto Z que deberá darse al medidor Parshall se estima con la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{(Q_{m\acute{a}x} \times H_{m\acute{i}n}) - (Q_{m\acute{i}n} \times H_{m\acute{a}x})}{(Q_{m\acute{a}x} - Q_{m\acute{i}n})}$$

Dónde:

Los caudales deben introducirse en m³/s y las alturas en m.

Desarenador

El desarenador tendrá dos canales iguales y paralelos. El dimensionamiento se establece para un canal. El nivel del canal se determina por medio del resalto Z. Las alturas de la lámina de agua en el desarenador es dado por la siguiente ecuación:

$$H_{desarenador} = H_{Parshall} - Z$$

El ancho del desarenador se estima con la siguiente ecuación, suponiendo V = 0.3 m/s:

$$b = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{H_{m\acute{a}x \text{ desarenador}} V}$$

Se deben verificar las velocidades reales para los tres caudales con sus respectivas alturas de lámina de agua, haciendo uso de la siguiente tabla:

Q (m ³ /s)	H (m)	(H-Z) (m)	S = b(H-Z) (m ²)	V = Q/S (m/s)
Máx				
Med				
Mín				

Los valores no deben tener diferencias mayores de ±20% con respecto al valor teórico adoptado de V = 0.3 m/s.

La longitud del desarenador se estima por la siguiente ecuación:

$$L = 25 \times H_{m\acute{a}x \text{ desarenador}}$$

Por consiguiente, el área longitudinal del desarenador se obtiene con la siguiente ecuación:

$$A = bxL$$

La tasa de escurrimiento debe ser verificada que este dentro del rango recomendable de 600 m³/m² · día a 1600 m³/m² · día, con la siguiente fórmula:

$$\text{Tasa escurrimiento} = \frac{Q_{med}(m^3/d)}{A (m^2)}$$

La cantidad de material retenido será:

$$q (l/día) = \frac{Q_{med}(m^3/día) \times 75}{1000}$$

Si se supone una limpieza cada 15 días, la profundidad útil del depósito inferior de arena será:

$$p (m) = \frac{q \left(\frac{m^3}{día} \right) * 15}{A}$$

Rejillas

Para el Dimensionamiento de las rejillas debe escogerse previamente su formato, dimensión, espaciamento y tipo de las barras. La sección de escurrimiento se determina para velocidades que no sean muy bajas, lo que acarrearía el aumento exagerado de materiales retenidos en las rejillas y el depósito de arena en el fondo del canal. Por otro lado, velocidades muy grandes provocarían el arrastre de materiales que deberían ser retenidos. Las velocidades recomendadas a través de las barras limpias son:

- Velocidad mínima: 0,60m/s para el caudal inicial.
- Velocidad máxima: 1,20 m/s para el caudal final.

Esos valores deben verificarse para los caudales mínimos, medio y máximo. Debe procurarse mantener una velocidad de escurrimiento alrededor de 0,60 m/s, con tolerancia de más o menos 20%.

Una vez que se determina la forma, la sección transversal y el espaciamento de las barras de la rejilla, se calcula el área útil necesaria para el escurrimiento con la siguiente fórmula:

$$A_u = \frac{Q_{máx}}{V}$$

Dónde:

A_u: área útil entre las barras (m²)

Q_{máx}: Caudal máximo (m³/s)

V: Velocidad mínima (m/s)

El área total S, incluidas las barras, se obtiene por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{A_u}{E}$$

Dónde:

E: eficiencia de la rejilla (numero decimal)

La eficiencia de las rejillas en función del espesor de las barras se muestra en la Tabla 9.

Espesor de las barras		Eficiencia: valores de E			
		3/4" (20mm)	1" (25mm)	1 1/4" (30mm)	1 1/2" (40 mm)
Pulgadas	mm				
1/4"	(6 mm)	0,75	0,8	0,83	0,857
5/16"	(8 mm)	0,706	0,768	0,803	0,826
3/8"	(10 mm)	0,677	0,728	0,77	0,8
7/16"	(11 mm)	0,632	0,696	0,741	0,774
1/2"	(13 mm)	0,6	0,667	0,715	0,755

Tabla 9. Eficiencia de las rejillas en función del espesor de las barras.
Fuente: (Rolim 2000)

La longitud del canal se obtiene al suponer movimiento uniforme para un tiempo $t=3s$, mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{Q_{m\acute{a}x} \times 3}{S}$$

El ancho del canal será:

$$b = \frac{S}{H_{m\acute{a}x \text{ desarenador}}}$$

Se debe hacer la misma verificación de las velocidades reales que se comentó anteriormente para el desarenador.

Siguiendo los rendimientos de remoción de la Tabla 10, se tomaron remociones conservadoras para esta fase del tratamiento, los valores son:

- SS=10%
- DBO₅=5%

❖ Tratamiento Primario

Según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable Y Saneamiento básico en Colombia RAS 2000 se define como “Tratamiento en el que se remueve una porción de los sólidos suspendidos y de la materia orgánica del agua residual. Esta remoción normalmente es realizada por operaciones físicas como la sedimentación. El efluente del tratamiento primario usualmente contiene alto contenido de materia orgánica y una relativamente alta DBO.”

Los tratamientos primarios más habituales son la Decantación primaria y los Tratamientos físico - químicos. El objetivo de la decantación primaria es la eliminación de la mayor parte de sólidos sedimentables, bajo la acción de la gravedad y procesos biológicos aerobios o anaerobios. Mientras en los tratamientos fisicoquímicos se realiza la adición de reactivos químicos, los cuales incrementan el tamaño y densidad de los mismos mediante procesos de coagulación floculación.(CENTA 2006)

❖ Tratamiento Secundario

Según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable Y Saneamiento básico en Colombia RAS 2000 se define como “Aquel directamente encargado de la remoción de la materia orgánica y los sólidos suspendidos.”

Este se realiza por medio de tratamiento biológico con la ayuda de microorganismos (fundamentalmente bacterias), que en condiciones aerobias actúan sobre la materia orgánica.

❖ Tratamiento Terciario

Conocidos también como tratamientos avanzados, permiten tener efluentes de mejor calidad para que puedan ser vertidos en zonas donde los requisitos son más exigentes, o para que puedan ser reutilizados en otros usos.

Los rendimientos medio de depuración en función del tipo de tratamiento según el manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales elaborado por CENTA (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua) se muestra en la Tabla 10.

	Sólidos en suspensión	DBO ₅	E. coli
	%	%	%
Pretratamiento	5 - 15	5 - 10	10 - 25
Tratamiento Primarios	40 - 70	25 - 40	5 - 15
Tratamiento Secundarios	80 - 90	80 - 95	90 - 98
Tratamiento Terciarios	50 - 75	95 - 98	98 - 99

Tabla 10 . Rendimientos medios de depuración en función del tipo de tratamiento
Fuente: (CENTA 2006)

4.1.4.6. Línea de lodos

El tratamiento de las aguas residuales conduce a la producción de unos subproductos conocidos como lodos o fangos. Cuando se realiza tratamiento convencional, los lodos requieren de varias etapas para la estabilización de los lodos. Estas etapas son: espesamiento, estabilización, acondicionamiento y deshidratación. Dependiendo de sus características estos

lodos pueden ser usados en agricultura, rellenos sanitarios, control de erosión, recuperación de suelos, etc.

4.1.4.7. Evacuación

Cuando se ha alcanzado el grado de tratamiento requerido por las normativas los efluentes pueden ser vertidos en el cauce más cercano. Aunque un destino alternativo de estos efluentes depurados, consiste en su reutilización en riego agrícola, refrigeración industrial, usos recreativos, recarga de acuíferos, etc. Cada uno de estos usos tiene sus respectivas normativas de niveles máximos de diferentes parámetros de calidad del agua.

4.2. Marco Normativo

Dentro del ordenamiento jurídico colombiano encontramos distintas normas en la Constitución, leyes, decretos y resoluciones que propenden por el cuidado y uso sostenible de los recursos naturales, destacando de esta manera su importancia y la función principal que tiene el Estado en su preservación.

4.2.1. Constitución Política de Colombia de 1991

Para un adecuado estudio normativo en materia ambiental es preciso partir de la Constitución, entendida como norma de normas, toda vez que allí se sientan las bases de las que deben partir el legislador y las distintas autoridades competentes para la regulación ambiental.

La carta política en el título II, capítulo III, establece los derechos colectivos y del medio ambiente. Para el caso que nos ocupa el artículo 79 consagra: *“Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”*. De esta manera la Constitución le encarga al Estado la función de la protección del medio ambiente y adicionalmente le otorga la competencia al legislador para que a través de leyes se garantice la participación de la comunidad en la temática ambiental, toda vez que se entiende como un derecho que nos afecta a todos en general.

En íntima relación con este tema encontramos el artículo 80 ibídem el cual señala: *“El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados”*. Esta norma también le atribuye al Estado el cuidado de los recursos naturales, para lo cual debe desarrollarse una adecuada política de planificación en la administración de los mismos.

Sumado a lo anterior los derechos colectivos y del medio ambiente adquieren aun una mayor relevancia al tener una relación directa con el goce efectivo del derecho a la salud, que se desprende del derecho fundamental a la vida en condiciones dignas.

Como otro punto importante para nuestro análisis, es necesario resaltar que la Carta eleva a rango constitucional a los tratados internacionales ratificados por Colombia en materia de derechos humanos, por lo que estos cuerpos normativos también deben ser tenidos en cuenta para un análisis integral de la temática ambiental.

Finalmente vale la pena mencionar que por vía jurisprudencial, la Corte Constitucional ha manifestado en recientes sentencias, que todos los derechos consagrados en la constitución de 1991, deben ser tomados como derechos fundamentales, pues el constituyente primario los elevó al rango constitucional por la importancia que tiene para la Nación y para lograr efectivamente los fines esenciales del Estado.

4.2.2. Ley 99 de 1993 y Ley 1444 de 2011

En cuanto a desarrollo legislativo, por medio de la ley 99 del 22 de diciembre de 1993 “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.”

A su turno, por la ley 1444 del 4 de mayo de 2011 “se escinden ministerios, se otorgan precisas facultades extraordinarias al presidente de la república para modificar la estructura de la administración pública y la planta de personal de la fiscalía general de la nación y se dictan otras disposiciones.”

Está en su art. 11 preceptúa: “Escíndase del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial los objetivos y funciones asignadas por la normas vigentes a los despachos del Vice ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial y al Despacho del Vice ministerio de Agua y Saneamiento Básico”

En el art. 12 se señala: “Reorganícese el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial el cual se denominará Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y continuará cumpliendo los objetivos y funciones señaladas en la normas vigente, salvo en lo concerniente a la escisión de que trata el artículo 11.” Agregando en el parágrafo. *“Serán funciones del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en todo caso, las asignadas al Ministerio de la ley 99 de 1993 y la ley 388, en lo relativo a sus competencias”*

La ley 99 en su Título I dicta los fundamentos de la política ambiental colombiana, enmarcados en 14 principios generales:

- Principio 1: El proceso de desarrollo económico y social del país se orientará según los principios universales y de desarrollo sostenible contenidos en la Declaración de Río de Janeiro de junio de 1992 sobre medio ambiente y desarrollo.
- Principio 2: La biodiversidad del país, por ser patrimonio nacional y de interés de la humanidad, deberá ser protegida prioritariamente y aprovechada en forma sostenible.
- Principio 3: Las políticas de población tendrán en cuenta el derecho de los seres humanos a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza.
- Principio 4: Las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial.
- Principio 5: En la utilización de los recursos hídricos, el consumo humano tendrá prioridad sobre cualquier otro uso.
- Principio 6: La formulación de las políticas ambientales tendrá en cuenta el resultado del proceso de investigación científica. No obstante, las autoridades ambientales y los particulares darán aplicación al principio de precaución conforme al cual, cuando exista peligro de daño grave e irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces para impedir la degradación del medio ambiente.
- Principio 7: El Estado fomentará la incorporación de los costos ambientales y el uso de instrumentos económicos para la prevención, corrección y restauración del deterioro ambiental y para la conservación de los recursos naturales renovables.

- Principio 8: El paisaje por ser patrimonio común deberá ser protegido.
- Principio 9: La prevención de desastres será materia de interés colectivo y las medidas tomadas para evitar o mitigar los efectos de su ocurrencia serán de obligatorio cumplimiento.
- Principio 10: La acción para la protección y recuperación ambientales del país es una tarea conjunta y coordinada entre el Estado, la comunidad, las organizaciones no gubernamentales y el sector privado. El Estado apoyará e incentivará la conformación de organismos no gubernamentales para la protección ambiental y podrá delegar en ellos algunas de sus funciones.
- Principio 11: Los estudios de impacto ambiental serán el instrumento básico para la toma de decisiones respecto a la construcción de obras y actividades que afecten significativamente el medio ambiente natural o artificial.
- Principio 12: El manejo ambiental del país, conforme a la Constitución Nacional, será descentralizado, democrático y participativo.
- Principio 13: Para el manejo ambiental del país, se establece un Sistema Nacional Ambiental, SINA, cuyos componentes y su interrelación definen los mecanismos de actuación del Estado y la sociedad civil.
- Principio 14: Las instituciones ambientales del Estado se estructurarán teniendo como base criterios de manejo integral del medio ambiente y su interrelación con los procesos de planificación económica, social y física.

Para efectos de esta investigación consideramos oportuno citar estos principios generales de la política ambiental colombiana, ya que la protección del medio ambiente y el uso racional y sostenible de los recursos son consagrados de forma directa o indirecta por estos. Además se instituyen en el eje fundamental de la ley para cumplir con los cometidos en materia ambiental contenidos en la Constitución. De esta manera, para lograr el cumplimiento de los principios a los que ya se hizo alusión, en conjunto con los fines constitucionales, se hace necesario un adecuado y eficiente tratamiento de las aguas residuales.

El título II, de la ley que se comenta, la cual alude al ministerio del medio ambiente y del sistema nacional ambiental dicta en el artículo 2° los objetivos de la creación del Ministerio, en el artículo 3° introduce el concepto de desarrollo sostenible como *“el que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de la vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades.”* A su turno el artículo 4° desarrolla el concepto del Sistema nacional ambiental SINA y el artículo 5° dicta las funciones del ministerio.

El título III derogado por el art. 20 del Decreto nacional 1687 de 1997, establece la estructura del ministerio del medio ambiente.

El título IV modificado por el Decreto Nacional 1124 de 1999 se crea el Concejo Nacional Ambiental y nombra sus miembros.

El título V del apoyo científico y técnico del ministerio enmarca las entidades adscritas y vinculadas al ministerio. En el párrafo del art. 16 se indica que: *“El Ministerio del Medio*

Ambiente contará además con el apoyo científico y técnico de los centros de investigaciones ambientales y de las universidades públicas y privadas y en especial del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional y de la Universidad de la Amazonía.”

En el título VI, en el cual se desarrolla el tema de las corporaciones autónomas regionales, el artículo 23° describe su naturaleza jurídica, dotándolas de autonomía administrativa y financiera, patrimonio propio y personería jurídica, además se resalta en que encargados por ley les corresponde, dentro del área de su jurisdicción, el medio ambiente los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas del Ministerio del Medio Ambiente.

El título VII el cual se refiere a las rentas de las corporaciones autónomas, en el art. 42 se fija las tasas las retributivas y compensatorias. Así, se establecen las tasas por utilización de aguas, el porcentaje ambiental de los gravámenes a la propiedad inmueble, transferencia del sector eléctrico, patrimonio y rentas de las corporaciones autónomas regionales. Además, se decreta en su artículo 48° que las auditorías a estas corporaciones estarán a cargo de la Contraloría General de la República.

Finalmente el título VII toca el tema de las licencias ambientales. El título IX el de las funciones de las entidades territoriales y de la planificación ambiental. El título X se refiere a los modos y procedimientos de participación ciudadana. El título XI habla de la acción de cumplimiento en asuntos ambientales lo cual fue derogado por el artículo 32° de la ley 393 de 1997. El título XII de las sanciones y medidas de policía. El título XIII del fondo nacional ambiental y del fondo ambiental de la Amazonía. El título XIV de la procuraduría delegada para asuntos ambientales. Y por último el Título XV de la liquidación del INDERA y de las garantías laborales y por último el título XVI de disposiciones finales.

4.2.3. Decreto 1594 DE 1984 y Decreto 3930 de 2010 “Usos del agua y residuos líquidos”

El decreto 1594 del 26 de Junio de 1894 fue derogado por el artículo 79 del decreto 3930 de 2010, salvo los arts. 20 y 21. Estos hacen referencia a las sustancias que son consideradas de interés sanitario, entendiéndose por usuario de interés sanitario aquel cuyos vertimientos contengan las sustancias señaladas en el art. 20.

El Decreto 3930 reglamenta todo lo referido a los usos de agua y residuos líquidos. De esta manera en el capítulo I, se dan las disposiciones generales como el objeto del decreto y el ámbito de aplicación. El capítulo II da definiciones para todos los efectos de la aplicación e interpretación del decreto. El capítulo III habla acerca del ordenamiento del recurso. En el art. 4 se define el ordenamiento del recurso hídrico como el proceso de planificación del mismo, mediante el cual la autoridad competente:

1. Establece la clasificación de las aguas.
2. Fija la destinación y sus posibilidades de uso.
3. Define los objetivos de calidad a alcanzar en el corto, mediano y largo plazo
4. Establece las normas de preservación de la calidad del recurso para asegurar la conservación de los ciclos biológicos y el normal desarrollo de las especies.

5. Determina los casos en que deba prohibirse el desarrollo de actividades como la pesca, el deporte y otras similares.
6. Fija las zonas en las que se prohibirá o condicionará, la descarga de aguas residuales o residuos líquidos o gaseosos, provenientes de fuentes industriales o domésticas, urbanas o rurales, en las aguas superficiales, subterráneas o marítimas.
7. Establece el programa de seguimiento al recurso hídrico con el fin de verificar la eficiencia y efectividad del ordenamiento del recurso.

El capítulo IV es acerca de la destinación genérica de las aguas superficiales, subterráneas y marinas. Se tienen en cuenta los siguientes usos del agua:

1. Consumo humano y doméstico
2. Preservación de flora y fauna
3. Agrícola
4. Pecuario
5. Recreativo
6. Industrial
7. Estético
8. Pesca, Maricultura y Acuicultura
9. Navegación y Transporte Acuático

El capítulo V y VI son los de mayor relevancia para esta investigación, ya que es donde se dictan los criterios de calidad para destinación del recurso y los vertimientos respectivamente. El art. 20 dicta que el Ministerio dentro de los dieciocho (18) meses contados a partir de la publicación del decreto, definirá los criterios de calidad para el uso de las aguas superficiales, subterráneas y marinas. Por tal motivo, para el proceso investigativo que se viene desarrollando se tendrá también en cuenta el decreto 1594 de 1984. El criterio admisible de importancia para los efectos que nos ocupan es el de coliformes totales y coliformes fecales. Estos valores en NMP (microorganismos/100ml) se muestran en la Tabla 11.

Uso	1	2	3	4	5, 8 (1)	5, 8 (2)	6, 7, 9
Coliformes totales	1,000	N/A	5,000	N/A	1,000	5,000	N/A
Coliformes fecales	N/A	N/A	1,000	N/A	200	N/A	N/A

Tabla 11. Valores admisibles coliformes para los diferente usos del agua, según Decreto 1594 de 1984.
(1): contacto primario
(2): contacto secundario

De los criterios de calidad anteriormente expuestos cabe resaltar que el valor presentado para el uso 1, correspondiente a consumo humano y doméstico, es si se aplica desinfección en el tratamiento del agua. Los criterios presentados para el uso 3 correspondiente a agricultura son aplicables cuando se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto.

En el capítulo VI se dictan las normas de vertimientos. El art. 28 es modificado por el art. 1, Decreto nacional 4728 del 23 de diciembre de 2010. Este dicta que el Ministerio dentro de los diez (10) meses, contados a partir de la fecha de publicación del decreto, expedirá las normas

de vertimientos puntuales a aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Por este motivo para efectos de esta investigación se tendrán en cuenta los del decreto 1594 de 1984. El art. 72 dicta que todo vertimiento a un cuerpo de agua o a un alcantarillado público de un usuario nuevo deberá cumplir, por lo menos con las siguientes normas:

- pH = 5 -9 unidades
- Temperatura = < 40 °C
- Material flotante = Ausente
- Grasas y aceites = Remoción > 80% en carga
- Sólidos suspendidos = Remoción > 80% en carga
- DBO = Remoción > 80% en carga
- DQO = Remoción > 80% en carga

El resto del contenido del decreto nacional 3930 de 2010 está dividido así: El capítulo VII de la obtención de permisos de vertimientos y planes de cumplimiento. El capítulo VIII del plan de reconversión a tecnologías limpias y gestión de vertimientos. El capítulo IX reglamentación de vertimientos. El capítulo X registro de los permisos de vertimientos. El capítulo XI disposiciones finales.

4.2.4. Resolución 1096 del 17 de Noviembre de 2000

Por la cual se adopta el Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2000. Este en su sección I presenta el título A, donde se imparten los aspectos generales de los sistemas de agua potable y saneamiento básico. La sección II, título B, C, D, E, F, G, contienen los manuales de prácticas de ingeniería para:

- Acueductos
- Potabilización
- Alcantarillados
- Tratamiento de aguas residuales
- Aseo urbano
- Aspectos complementarios de construcción de obras civiles

Siendo los títulos A y E los de importancia para esta investigación, ya que en estos se fijan los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que se desarrollen en la República de Colombia, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia, sostenibilidad, y redundancia dentro de un nivel de complejidad determinado.

4.2.5. Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura OMS

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estas se asegura que el principal objetivo del tratamiento de aguas residuales para aprovechamiento es la eliminación de agentes patógenos. Estas normas tienen exigencias diferentes dependiendo del tipo de aprovechamiento que se le dará como se muestra en Tabla 12.

Categoría	Condiciones de aprovechamiento	Grupo expuesto	Nemátodos intestinales (N° de huevos por litro)	Coliformes fecales (CF/100ml)	Tratamiento de aguas residuales necesario para lograr la calidad
A	Riego de prados públicos, zonas verdes de contacto directo	Trabajadores y público	≤ 1	≤ 200	Serie de estanques de estabilización que permiten lograr la calidad microbiológica indicada o tratamiento equivalente
	Riego de cultivos que comúnmente se consumen crudos	Trabajadores y consumidores	≤ 1	≤ 1000	
B	Riego de cultivos de cereales industriales y forraje, praderas y arboles	Trabajadores	≤ 1	No se recomienda ninguna forma	Retención es estanques de estabilización por 8 a 10 días o eliminación equivalente de helmintos y coliformes fecales
C	Riego localizado de cultivos tipo B cuando ni los trabajadores ni el público están expuestos	Ninguno	N/A	N/A	Tratamiento previo, según lo exija la tecnología de riego por no menos que sedimentación primaria

Tabla 12. Directrices recomendadas sobre calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura
Fuente: (OMS 1989)

4.3. Sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales

La depuración de aguas residuales por medio de sistemas donde se recrean los ecosistemas acuáticos como lagunas y humedales, son una alternativa viable para pequeñas poblaciones bajo diferentes puntos de vista. Estos también son llamados “sistemas naturales” y permiten con un bajo costo energético, un mantenimiento sin altos requerimientos técnicos y nulo impacto ambiental, la depuración de aguas residuales con altas eficiencias de remoción en los diferentes parámetros de interés sanitario.

Sistemas acuáticos naturales son normalmente excavados en suelos naturales construidos con diques perimetrales. Pueden ser o no alineados, dependiendo del tipo de terreno y la topografía. Se deben asegurar bordes libres (recomendado mayor a 60 cm) para prevenir problemas con vientos fuertes. Las bombas y tuberías, si son requeridas, deben ser de materiales resistentes a la corrosión. Cercado es requerido alrededor para restringir el acceso.

La operación y mantenimiento de estos sistemas es mínimo. La atención debe prestarse para el monitoreo del flujo y ajustes, si son requeridos. Estructuras de entrada y salida, canales, caminos, y superficies deben ser inspeccionadas para su limpieza y mantenimiento. La gestión de lodos es relativamente simple, ya que la acumulación es lenta en un periodo de 10 a 15 años. Cuando las lagunas tienen algún sistema de tratamiento preliminar como tanques sépticos, se reduce en grandes proporciones la acumulación de lodos. También deben ser monitoreados los parámetros de calidad del agua en el efluente. El personal necesario para las labores cotidianas no debe ser calificado y las visitas de personal calificado de la entidad encargada de la operación es periódico.

4.3.1. Tanque Séptico

El tanque séptico es un sistema que proporciona el tratamiento primario de aguas residuales domesticas creando condiciones de quietamiento dentro de un recipiente cubierto, hermético rectangular, ovalado, o cilíndrico, que típicamente es enterrado. Estos sistemas remueven materia flotante, sólidos suspendidos, almacenan y digieren materia orgánica y además pueden atenuar un pico en el caudal de entrada. Los porcentajes de remoción en materia flotante, tal como sólidos, aceites, grasas u otros está entre el 60 - 80 %.(U.S. Environmental Protection Agency (EPA) 2002)

El principal objetivo del diseño del tanque séptico es crear dentro de este una situación de estabilidad hidráulica, que permita la sedimentación por gravedad de las partículas pesadas. El material sedimentado forma en la parte inferior una capa de lodo que se compacta debido al peso del líquido y a los sólidos que soportan, por ello su volumen es mucho menor que el de los sólidos contenidos en las aguas residuales que llegan. La grasa, el aceite y otros materiales menos densos que flotan en la superficie del agua formando una capa de espuma pueden llegar a endurecerse considerablemente, por lo cual el lodo y la espuma deben ser removidas periódicamente. El líquido contenido en el tanque experimenta transformaciones bioquímicas, siendo la digestión de la materia orgánica la de mayor interés. La velocidad del proceso de digestión aumenta con la temperatura, siendo el máximo alrededor de los 35°C. Los desinfectantes en cantidades anormales hacen que mueran las bacterias, inhibiendo así el proceso de digestión. (OPS/CEPIS 2005)

En estudios realizados sobre eficiencia de los tanques sépticos se indican las siguientes conclusiones principales:

- El tanque séptico debe tener un período de retorno mayor a 24 horas.
- El tanque séptico debe tener una configuración de la unidad de salida con pantalla para grasas
- La relación de área superficial a profundidad debe ser mayor de 2
- Se debe preferir un tanque de cámaras múltiples con interconexiones similares a las de la unidad de salida. (Romero 2004)

La geometría afecta el tiempo de retención hidráulico, por ende la relación largo:ancho y la profundidad son consideraciones importantes. Tanques alargados con relación l:a de 3:1 y mayores han mostrados la reducción en cortos circuitos en el flujo a través del tanque. Tanques con compartimientos en serie logran mayores remociones que tanques de compartimiento simple, para el caso de un tanque de dos compartimientos la mejor remoción de sólidos suspendidos se logra cuando el primer compartimientos es igual a $1/2 - 2/3$ del volumen total del tanque (U.S. Environmental Protection Agency EPA 2002). En la Figura 3 se muestra el esquema de un tanque séptico de dos compartimientos.

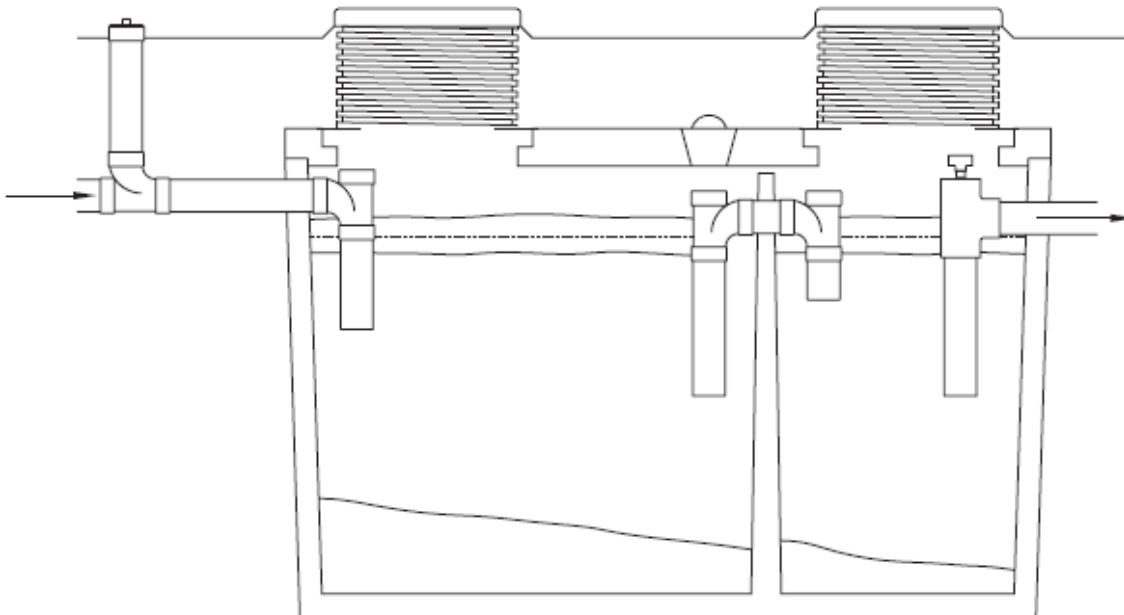


Figura 3. Corte tanque séptico de dos compartimientos
Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency EPA 2002)

Los siguientes criterios se recomiendan para la localización de un tanque séptico:

- Para proteger las fuentes de agua, el tanque debe localizarse a más de 15 m de cualquier fuente de abastecimiento.

- El tanque no debe estar expuesto a inundación y debe disponer de espacio suficiente para la construcción del sistema de disposición o tratamiento posterior a que haya lugar.
- El tanque debe tener acceso apropiado para su limpieza y mantenimiento sea fáciles.(Romero 2004)

4.3.1.1. Modelo general de diseño

Para cumplir los objetivos ya mencionados, se debe asegurar un tiempo retención prolongado. El volumen, geometría y número de compartimientos afectan el tiempo de retención.

El Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000 en su título E “Tratamiento de aguas residuales” dicta una serie parámetros que deben ser tenidos en cuenta para los tipos de tanques que pueden tenerse en cuenta, la localización de estos, la operación y el mantenimiento y el dimensionamiento. En cuanto al dimensionamiento dicta “El diseñador debe seleccionar una metodología de diseño que garantice el correcto funcionamiento del sistema teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Rendimiento del proceso de tratamiento.
- Almacenamiento de lodos.
- Amortiguamiento de caudales pico.

Y en el anexo E se puede encontrar una metodología de cálculo usual.”

Para efecto de esta investigación se utilizó el criterio propuesto por Jairo Alberto Romero Rojas, en su libro tratamiento de aguas residuales. Este modelo es el del USPHS (United States Public Health Service):

$$C = 1.5 \cdot Q$$

$$C = 4.26 + 0.75 \cdot Q_1$$

Dónde:

C = capacidad total del tanque (m³)

Q = caudal aguas residuales (m³/d), para Q < 5.7 m³/d

Q₁ = caudal aguas residuales (m³/d), para Q₁ = 5.7 a 380 m³/d

4.3.1.2. Remoción de contaminantes

La remoción de DBO puede ser del 30 al 50%, de grasas y aceites un 70 a 80%, de fósforo un 15% y de un 50 a 70% de sólidos suspendidos, para aguas residuales domesticas típicas.

La eliminación de organismos patógenos en tanques sépticos son muy parecidos a los que se dan en los sistemas de lagunaje, y puede ser calculado con el modelo de cinética de primer orden (Reed & Middlebrooks 1995).Esta se presenta en el diseño de las lagunas de maduración.

4.3.2. Humedales

Humedales son áreas que durante parte o todo el año por su ubicación están húmedos, dependiendo de sus plantas, condiciones del agua, geográfica, suelo entre otras varia su nombre y funcionamiento. La característica unifican te es que los humedales son lo suficientemente húmedos y largos que excluyen algunas especies de plantas que no pueden vivir bajo las condiciones de saturación del terreno. En estas profundidades que varían entre 40 cm y 1m con plantas emergentes como juncos, espadañas, carrizos entre otras y algunos sembrados en heliconias o papiros (*Cyperuspapyrus*). (Véase Figura 4 y Figura 5).(Kadlec & Wallace 2009)



Figura 4. Tipos de plantas emergentes más comunes en los humedales.

Fuentes: <http://derechoambientalcolombiano.org/contentDetail.php?id=78>

<http://www.madrimasd.org/informacionidi/noticias/noticia.asp?id=25006>

<http://ichn.iec.cat/Bages/z-humides/cz-humides.htm>

Frecuentemente se encuentran variando entre profundamente inundado con lámina de agua como se muestra en la Figura 4, y parcialmente con flujo de agua solamente en su parte subterránea como se muestra en Figura 5. Estos son un sistema utilizados normalmente como tratamiento secundario o terciario, ya que altas concentraciones de sedimentos pueden ocasionar problemas de colmatación.



Heliconias



Cyperus papyrus

Figura 5. Tipos de plantas en humedales sembrados

De esta diferencia en la altura de la lámina de agua es como se dividen en Humedales de flujo libre HFL y Humedales de flujo subsuperficial HFS. La Vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y adsorción de los constituyentes de agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar. Estos procesos se llevan a cabo por las siguientes tres funciones que ejercen:

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.
- Utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.(Lara 1999)

4.3.2.1. La vegetación

Las plantas que se presentan en los humedales cumplen tareas fundamentales como transferir el oxígeno a la zona de raíces, penetrando la tierra y transportando este importante elemento a la parte más profunda. Las hojas y tallos muertos que caen sumergidos se degradan convirtiéndose en una excelente sustrato para el crecimiento de la película microbiana responsable de la transformación de la materia orgánica. Consumen los elementos como carbono, nutrientes, y elementos de traza y los incorpora a los tejidos de la planta.(Lara 1999)

4.3.2.2. Microorganismos

Los encargados de la transformación de los nutrientes como ya se dijo son los microorganismos como bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. En este proceso del tratamiento se reciclan nutrientes transformando sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles. Pueden ser procesos tanto aerobios (con presencia de oxígeno) como anaerobios (ausencia de oxígeno) o facultativos son las especies bacterianas que se adaptan al cambio en las condiciones medioambientales. Sustancias tóxicas como metales pesados, desinfectantes

o pesticidas pueden perjudicar la comunidad microbiana, disminuyendo la eficiencia del sistema, ya que muchos microorganismos se inactivan.(Lara 1999)(Kadlec & Wallace 2009)

4.3.2.3. Animales

Los humedales son hábitat de diferentes seres vivos, entre los que se encuentran tanto vertebrados como invertebrados. Muchos de estos animales participan también en la transformación de materia orgánica consumiéndola o cumpliendo labores ecológicas como el de las ninfas de libélula que son rapaces de larvas de mosquito. Entre los animales invertebrados que se pueden encontrar están una gran variedad de insectos y gusanos y entre los vertebrados están las aves, anfibios y mamíferos.(Lara 1999)(Kadlec & Wallace 2009)

4.3.2.4. Mejoramiento del paisaje

Normalmente los sistemas de tratamiento de aguas residuales son un problema para los habitantes aledaños, ya que afectan de forma directa el paisaje. Los humedales proporcionan beneficios en este sentido, ya que aumentan la estética del paisaje pasando desapercibidos como sistemas de tratamiento de aguas residuales. Estos pueden ser diseñados y sembrados para que adapten a la naturaleza del sitio y realcen la belleza y la diversidad.(Lara 1999)

4.3.2.5. Tipos de humedales

– Humedal de flujo libre (HFL)

Consiste en un sistema con la superficie del agua expuesta a la atmosfera, vegetación flotante y plantas emergentes. A medida que el agua residual fluye por el humedal, esta es tratada por los procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, absorción y precipitación. Como estos sistemas son construidos para simular los humedales naturales pueden ser atractivos para varios tipos de vida como insectos, moluscos, pescado, anfibios, reptiles, pájaros, y mamíferos. Los elementos básicos se muestran en la Figura 6.(Kadlec & Wallace 2009)

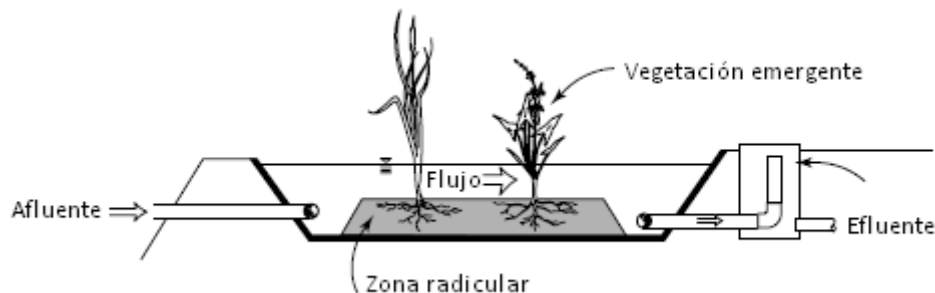


Figura 6. Elementos básicos HFL
Fuente: (Kadlec & Wallace 2009)

A estos sistemas normalmente se les aplica el efluente proveniente de tratamientos primarios como lagunas, tanques sépticos, fangos activados, etc.

– Humedal de flujo Subsuperficial (HFS)

En estos sistemas el agua a tratar circula exclusivamente a través de un material granular (arena, gravilla, grava, etc.), de permeabilidad suficiente, con impermeabilización. La vegetación es sembrada en el medio de soporte. Como en el HFL a medida que el agua residual fluye por el humedal, esta es tratada por los procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, absorción y precipitación, además también pueden ser atractivos para varios tipos de vida como insectos, moluscos, pescado, anfibios, reptiles, pájaros, y mamíferos. Los elementos básicos se muestran en la Figura 7. (Kadlec & Wallace 2009) (CENTA 2006)

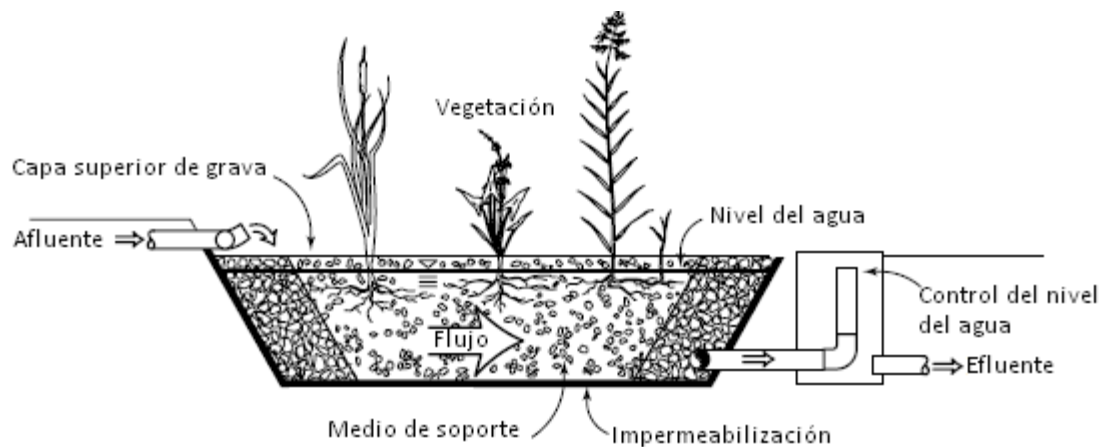


Figura 7. Elementos básicos HFS
Fuente: (Kadlec & Wallace 2009)

A estos sistemas también normalmente se les aplica el efluente proveniente de tratamientos primarios como lagunas, tanques sépticos, fangos activados, etc.

4.3.2.6. Modelo general de diseño

Los Humedales pueden ser considerados como reactores biológicos, y su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo a pistón para la remoción de DBO y nitrógeno (Lara 1999). Los modelos de diseño presentados son los sugeridos por Sherwood C. Reed en su libro “*Natural Systems for Waste Management and Treatment.*” La siguiente es la ecuación básica de los reactores de flujo a pistón:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k_t x t}$$

Dónde:

C_e : Concentración del contaminante en el efluente (mg/l)

C_o : Concentración del contaminante en el afluente (mg/l)

K_t : Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura (día^{-1})

T: Tiempo de retención hidráulica (día)

Este tiempo de retención hidráulica en el humedal puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{LWyn}{Q}$$

Dónde:

L: Largo de la celda del Humedal (m)

W: Ancho de la celda del Humedal (m)

y: Profundidad de la celda del humedal (m)

n: Porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal. La vegetación y los residuos ocupan espacio en los humedales tipo HFL, y el medio, raíces y otros sólidos hacen lo mismo en los de tipo HFS. La porosidad es un porcentaje expresado como decimal.

Q: Caudal medio a través del humedal ($\text{m}^3/\text{día}$)

Combinando ambas ecuaciones es posible determinar el área superficial del humedal con la siguiente ecuación:

$$A_s = LW = \frac{Q \cdot \ln(C_0/C_e)}{K_t \cdot y \cdot n}$$

Dónde:

A_s : Área superficial del humedal (m^2)

El valor de K_t depende del contaminante que se quiere remover y de la temperatura, más adelante se presentarán los valores para cada caso. Como las relaciones biológicas del tratamiento y un buen diseño dependen de la temperatura es preciso estimar la del agua en el humedal (Lara 1999). La temperatura del agua puede estimarse mediante innumerables correlaciones existentes entre la temperatura del agua y el aire (Rolim 2000). Las principales correlaciones desarrolladas se presentan en la Tabla 1.

Lugar	Ecuación	r ²	Referencia
Campina Grande, Brasil (1978)	Tagua = 10,966 + 0,611 Taire	0,744	Auerswald (1979)
Lima, Peru (1982)	Tagua = 10,443 + 0,688 Taire	0,828	Burgers (1982)
Lima, Peru (1982)	Tagua = 9,336 + 0,780 Taire	0,831	Burgers (1982)
Melipilla, Chile (1972)	Tagua = 3,685 + 1,137 Taire	0,970	Vargas y Sánchez (1972)
Melipilla, Chile (1982)	Tagua = -0,235 + 1,404 Taire	1,000	Vargas y Sánchez (1972)
Ammán, Jordania	Tagua = 2,688 + 0,945 Taire	0,975	Yañez y Pescod (1988)

Tabla 13. Correlaciones de temperatura en varios países
Fuente: (Rolim 2000)

Un adecuado diseño requiere tener en cuenta consideraciones hidráulicas, térmicas y las cinéticas de remoción de los diferentes contaminantes. Las consideraciones térmicas deben tenerse en cuenta en climas muy fríos, donde se presenta formación de hielo en el sistema.

El diseño hidráulico está basado en asumir un flujo a pistón con un flujo uniforme a través de la sección del humedal con mínimos flujos preferenciales. Este diseño es crítico para el éxito de su rendimiento, ya que el flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción causada por la vegetación, sedimentos, medio filtrante, entre otros.

El contaminante que requiera la mayor área para su remoción, será el factor limitante en el diseño y controlará el tamaño del humedal. Por último se determina la forma final (relación largo:ancho) y la velocidad de flujo del humedal. Esta relación tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema, ya que grandes relaciones largo ancho 10:1 o mayores asegurarían un flujo a pistón, pero podría sufrir desbordamientos. Por lo tanto, las relaciones recomendadas son de 1:1 a 4:1. (Lara 1999)

Teniendo el área superficial del humedal (A_s) mediante el modelo de remoción del contaminante limitante se procede a realizar el diseño hidráulico.

– Diseño Hidráulico HFL

Con la siguiente ecuación se calcula la longitud máxima aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado:

$$L = \left[\frac{A_s y^{8/3} m^{1/2} \cdot 86400}{a \cdot Q} \right]^{2/3}$$

Dónde:

Q: caudal (m³/d)

A_s: área superficial de la celda del humedal (m²)

y: profundidad del agua en el humedal (m)

m: pendiente del fondo del lecho (% expresado como decimal). Este valor esta típicamente entre 10 y 30% de la pérdida de carga disponible.

a: factor de resistencia (s·m^{1/6})

- 0,4 s·m^{1/6} para vegetación escasa y y>0,4 m
- 1,6 s·m^{1/6} para vegetación moderadamente densa con profundidades de agua residual de y ≈0,3 m
- 6,4 s·m^{1/6} para vegetación muy densa y capa de residuos, en humedales con y ≤ 0,3 m

Teniendo el L máximo de la celda procedemos a calcular el ancho W de la celda y verificar si cumple la relación largo:ancho sugerida de 1:1 a 4:1. En caso que esta relación sea menor se divide el humedal en el número de celdas necesarias para que la relación largo: ancho este entre el rango sugerido. En caso de que la relación sea mayor, se coloca el límite superior fijo y se procede a calcular las dimensiones de la o las celdas.

– **Diseño Hidráulico HFS**

Con la siguiente ecuación se calcula el ancho mínimo aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado:

$$W = \frac{1}{y} \left[\frac{Q \cdot A_s}{m \cdot k_s} \right]^{0.5}$$

Dónde:

Q: caudal (m³/d)

A_s: área superficial de la celda del humedal (m²)

y: profundidad del agua en el humedal (m)

m: pendiente del fondo del lecho (% expresado como decimal). Este valor esta típicamente entre 5 y 20% de la pérdida de carga potencial.

K_s: Conductividad hidráulica (m³/m²/d) La presenta órdenes de magnitud estimados para un rango de materiales granulares que podrían ser usados en un humedal HFS. (Véase Tabla 14)

Teniendo el W mínimo de la celda procedemos a calcular el largo L de la celda y verificar si cumple la relación largo:ancho sugerida de 1:1 a 4:1. En caso que esta relación sea menor se divide el humedal en el número de celdas necesarias para que la relación largo: ancho este entre el rango sugerido. En caso de que la relación sea mayor, se coloca el límite superior fijo y se procede a calcular las dimensiones de la o las celdas.

Tipo de material	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Porosidad n (%)	Conductividad hidráulica ks ($m^3/m^2/d$)
Arena gruesa	2	28-32	100-1.000
arena gravosa	8	30-35	500-5.000
Grava fina	16	35-38	1.000-10.000
Grava media	32	36-40	10.000-50.000
Roca gruesa	128	38-45	50.000-250.000

Tabla 14. Características típicas de los medios para humedales HFS
Fuente: (Lara 1999)

4.3.2.7. Remoción de DBO

La siguiente formula es una aproximación a partir del análisis de datos de rendimientos de sistemas de este tipo en operación:

$$K_t = K_{20}(1,06)^{(T-20)}$$

Para HFL:

$$K_{20} = 0,678 d^{-1}$$

Para HFS:

$$K_{20} = 1,104 d^{-1}$$

El área superficial del humedal se determina con la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{Q \cdot (\ln C_o - \ln C_e)}{K_t \cdot y \cdot n}$$

Siendo y la profundidad del sistema en metros y n la porosidad.

4.3.2.8. Remoción SST

La remoción de sólidos suspendidos totales en los humedales no es un parámetro limitante en el diseño y dimensionamiento del humedal, ya que la remoción de SST es muy rápida en comparación con la de la DBO (Lara 1999). A continuación se presentan ecuaciones obtenidas de la regresión lineal de datos obtenidos en Estados Unidos:

Para HFS:

$$C_e = C_o(0,1058 + 0,0014(CH))$$

Para HFL:

$$C_e = C_o(0,1139 + 0,00213(CH))$$

C_e : SST en el efluente (mg/l)

C_o : SST en el afluente (mg/l)

CH: Carga hidráulica Q/A_s (cm/d)

4.3.2.9. Remoción de Patógenos

La eliminación de organismos patógenos en humedales construidos son muy parecidos a los que se dan en los sistemas de lagunaje, y puede ser calculado con el modelo de cinética de primer orden (Reed & Middlebrooks 1995). Esta se presenta en el diseño de las lagunas de maduración.

4.3.3. Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización son el método más simple de tratamiento de aguas residuales que existe para los países de clima tropical, ya que ofrece condiciones ideales para el tratamiento mediante procesos naturales (Rolim 2000). Son excavaciones de profundidad variable, con taludes en tierra e impermeabilización. Generalmente rectangular o cuadrada.

Durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y las condiciones climáticas se estabiliza la materia orgánica presente en el agua residual a través de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos en los que intervienen microorganismos.

Las lagunas son análogas a los tanques sépticos y digestores anaerobios no calentados, pues el rango de cargas correspondientes son iguales a los de las lagunas anaerobias. Durante el tiempo de retención en la laguna el agua residual pasa por los siguientes cambios:

- La mayor parte de los sólidos suspendidos habrán sedimentado en el fondo de la laguna. Aunque el contenido de sólidos en suspensión se ve estrictamente limitada y reducida por la gran proliferación de colonias de algas, las cuales producen un efecto contrario al que se desea obtener.
- Se abra producido alguna eliminación de agentes patógenos.
- La descomposición anaerobia de sólidos suspendidos y bacterias produce una concentración y mineralización en el fondo. (Alamancos 1999).

4.3.3.1. **Microbiología**

Los tipos de microorganismos que se desarrollan en los diferentes tipos de lagunas vienen determinados por las características de las aguas contenidas. Estos microorganismos principalmente son: Bacterias, Fitoplancton y Zooplancton además de la fauna típica conocida como Benthos.(CENTA 2006). En la Figura 8 se muestra el ciclo trófico que se establece en los sistemas de lagunaje.

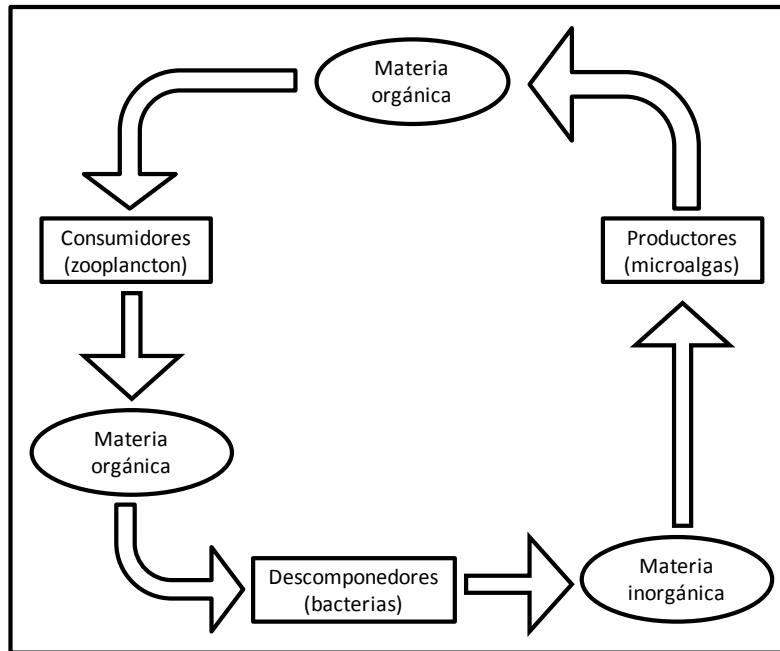


Figura 8. Ciclo trófico en los sistemas de lagunaje
Fuente: (CENTA 2006)

4.3.3.2. **Bacterias**

Las bacterias predominantes responsables de los procesos de oxidación proporcionan un ambiente favorable para que se desarrollen las poblaciones de algas, y a través de la fotosíntesis generan gran cantidad de oxígeno disuelto (Rolim 2000). Los tipos de bacterias varían extensamente en sus exigencias ambientales y preferencias, por ejemplo algunas bacterias solo pueden crecer en presencia de oxígeno (aerobias), otras sólo pueden crecer en ausencia (anaerobias) y otras pueden crecer en cualquiera de las dos situaciones (facultativas) aunque el crecimiento es mejor en presencia de oxígeno (Mara 1976).

En los ambientes anaerobios de las lagunas los dos grupos principales de bacterias están constituidos por las formadoras de ácidos y por las metanogénicas. Del equilibrio de ambas poblaciones depende el correcto funcionamiento de los sistemas. Las formadoras de ácidos incluyen bacterias heterótrofas capaces de convertir materiales orgánicos complejos en compuestos más simples como alcoholes y ácidos orgánicos, los cuales posteriormente son usados como sustratos por las bacterias metanogénicas. En el grupo de bacterias metanogénicas estrictamente anaerobias, se encuentran los grupos: Methanobacteriumsp., methanococcussp., methanosarcinasp., methanospirillumsp. y las reductoras de sulfatos desulfobiosp.

En los ambientes aerobios las bacterias más frecuentes son similares a las que se encuentran en sistemas de lodos activados son los géneros: achromobactersp., alcaligenessp., flavobacteriumsp., y pseudomonassp.

Las cianobacterias, también conocidas como algas verdeazuladas utilizan como principal fuente de carbono el CO₂, aunque también pueden emplear compuestos orgánicos de bajo peso molecular. Por medio de procesos fotosintéticos, son los encargados de aportar oxígeno a las aguas y además son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico. Se encuentran los géneros: Anabaenasp., anacytistissp., oscillatoriasp., y phormidiumsp.

Por último algunas las bacterias patógenas que se encuentran normalmente en las lagunas pertenecen a los géneros: escherichiasp., francisellasp., leptospirasp., salmonella sp., shigellasp. Y vibriosp. Estas son bacterias que por consecuencia de fenómenos de sedimentación, competencia, degradación, cambios de pH y temperatura, radiación solar, entre otras normalmente no sobreviven a largos periodos en los medios acuáticos (CENTA 2006).

4.3.3.3. *Fitoplancton*

Las algas son organismos acuáticos unicelulares o pluricelulares básicamente autótrofos, pues son heterótrofos con compuestos orgánicos simples. Desempeñan un papel fundamental, ya que mediante el proceso de fotosíntesis aportan al medio líquido el oxígeno necesario para la degradación biológica de la materia orgánica y para la vida de otros microorganismos. Entre los grupos principales de microalgas se destacan: clorophyta o algas verdes, euglenophyta y bacillariophyta o diatomeas. (CENTA 2006) (Mara 1976)

Las poblaciones de microalga experimentan variaciones durante los meses fríos. La concentración de biomasa algal en las lagunas es función de la carga superficial con las que estas operan, oscilando entre 1 y 3 mg de "clorofila a" por litro. (CENTA 2006)

4.3.3.4. *Zooplancton*

Son considerados los organismos animales que viven en las aguas residuales. Los grupos fundamentales son protozoos y rotíferos. Los protozoos poseen cilios que les permite desplazarse en el agua, o con los que impulsan el alimento hacia su cavidad digestiva. Los rotíferos poseen una corona ciliada que al vibrar crea corriente que aprovechan para su alimentación y locomoción. El zooplancton se alimenta de bacterias, nanofitoplancton, partículas orgánicas y otros, contribuyendo así a la depuración. (CENTA 2006)

4.3.3.5. *Benthos*

Son considerados la fauna adaptada a vivir en condiciones de poca luz y escasas concentraciones de oxígeno disuelto. Los quironómidos son los principales organismos que contribuyen con la estabilización de la materia orgánica, ya que presentan un elevado grado de tolerancia a las condiciones eutróficas de los sedimentos. (CENTA 2006)

4.3.4. Radiación solar

La energía solar es indispensable para el funcionamiento de ciertos procesos que se llevan a cabo en las lagunas. Contribuye a la producción de oxígeno por medio de fotosíntesis de las algas (Rolim 2000). La radiación solar se define como la radiación total de luz directa, difusa o

dispersa, que se recibe sobre una superficie, por unidad de superficie y unidad de tiempo expresada en Langleys/d o cal/cm².d. La cantidad depende de la latitud del lugar, pero también está influenciada por la altitud, la nubosidad y la contaminación atmosférica (CENTA 2006).

4.3.5. Temperatura

Las reacciones físicas, químicas y bioquímicas que ocurren en las lagunas de estabilización son muy influenciadas por la temperatura. Este parámetro se relaciona con la radiación solar y afecta la velocidad de la fotosíntesis como el metabolismo de las bacterias responsables de la depuración de las aguas residuales (Rolim 2000). Para tener en cuenta el escenario más crítico de depuración por medio de lagunaje, muchos métodos de diseño toman como valor de la temperatura el promedio del mes más frío, asegurando así las remociones en todos los escenarios (CENTA 2006).

4.3.6. Viento

La acción de los vientos tiene efectos positivos en los procesos que se llevan a cabo en las lagunas pero también pueden ocasionar molestias en las poblaciones aledañas por los olores, por lo que se recomienda ubicarlas a 500 ó 1.000 metros de la comunidad. Entre los efectos positivos sobre el comportamiento de estos sistemas se encuentra que contribuyen a la oxigenación de las aguas vía re aireación superficial dependiendo de la velocidad de este y favoreciendo las condiciones de mezcla en las lagunas, evitando fenómenos de estratificación (Rolim 2000). Debe evitarse colocar las zonas de entrada y salida de la laguna en la misma dirección de los vientos dominantes, ya que se puede provocar la creación de corrientes superficiales preferenciales afectando significativamente los rendimientos.

4.3.7. Evaporación y precipitación

La relación entre evaporación y precipitación es importante por varios aspectos. Cuando la esta relación es positiva a favor de la evaporación provoca una mayor concentración de sustancias contaminantes, aumentando la salinidad del medio lo cual puede afectar negativamente el equilibrio biológico. El efecto de la lluvia puede afectar el oxígeno disuelto, debido a la demanda adicional provocada por los sólidos arrastrados por el agua lluvia, aunque como contrapartida la lluvia también puede generar oxigenación por la caída sobre la superficie de la laguna. Otro aspecto que afecta es el caudal del efluente, pues dependiendo de esta relación, puede ser mayor o menor al de entrada (CENTA 2006). (Rolim 2000)

4.3.8. Tipos de Lagunas de estabilización

En función del tipo de reacciones que ocurren en las lagunas estas son divididas en tres tipos: anaerobias, facultativas y de maduración. (Alamancos 1999) (Mara 1976)

4.3.8.1. *Lagunas anaerobias (LA)*

Son aquellas lagunas donde la carga orgánica aplicada es tan grande que toda la masa de agua se encuentra sin oxígeno disuelto ($> 100 \text{ g DBO}_5/\text{m}^3.\text{d}$), por eso su nombre anaerobia. La materia orgánica es degradada por medio de procesos anaeróbicos, donde las principales reacciones biológicas que se producen son la formación de ácidos y la fermentación metánica (Alamancos 1999). Como subproducto de las reacciones anaerobias se genera biogás (mezcla de metano y de anhídrido carbónico), el cual se desprende en forma de burbujas (CENTA 2006).

Son lagunas de 3 a 5 m de profundidad (Rolim 2000), con una profundidad óptima desde el punto de vista de tratamiento, y en lo posible no deben ser menores a los 2.5 m. (Alamancos 1999). En estas tienen lugar la decantación primaria de la materia sedimentable, la cual se va acumulando en el fondo. Estos lodos decantados experimentan reacciones de degradación anaerobia, tras un tiempo de operación, que suele oscilar entre 5 y 10 años se procede a sacarlos. Estos lodos por encontrarse altamente mineralizados, solo requieren ser deshidratados antes de su disposición final (CENTA 2006).

Entre los objetivos que se pretenden cumplir con estas lagunas son: retener la mayor cantidad posible de sólidos sedimentables y flotantes y estabilizar los lodos acumulados en el fondo. Por esta razón estas lagunas guardan similitudes con los tanques sépticos y los tanques imhoff.

Para efectos de esta investigación se utilizó el método de diseño de Duncan Mara en su libro "Domestic waste wáter treatment in developing countries", por considerarlo el más apropiado, ya que sus investigaciones son realizadas en sistemas con las características climáticas de Colombia.

4.3.8.2. Modelo general de diseño (LA)

Lagunas anaerobias pueden ser diseñadas satisfactoriamente, sin el riesgo de malos olores basándose en la carga volumétrica de DBO, λ_v (g/m³ d). El valor permisible de carga volumétrica aumenta en función de la temperatura, se sugiere un rango de 100 – 400 g/m³ d para mantener las condiciones anaerobias y evitar malos olores .En la Tabla 15 se muestran los valores de diseño para carga volumétrica de DBO en función de la temperatura y así mismo los porcentajes de remoción de DBO.

T de Diseño (°C)	Carga Volumetrica (g DBO /m ³ .día)	% de reduccion para la DBO
< 10	100	40
10 - 20	20T - 100	2T + 20
20-25	10T + 100	2T + 20
> 25	350	60

Tabla 15. Valores de diseño de la carga volumétrica de DBO y porcentajes de remoción en función de la temperatura de diseño (T) Fuente: (Mara 2003)

Como ya se mencionó anteriormente el valor de diseño para la temperatura es el promedio del mes más frío.

Luego se procede a calcular el área superficial cubierta por el nivel medio de la profundidad con la siguiente fórmula:

$$A_a = \frac{L_i \times Q}{\lambda_v \times h}$$

Donde,

L_i : efluente de DBO (mg/l)

Q: caudal (m³/d)

λ_v : carga volumétrica de DBO ($\text{g/m}^3 \text{ d}$)

h: Profundidad de la laguna

El siguiente paso es calcular el tiempo de retención hidráulico, el cual no debe ser menor a 1 día con la siguiente fórmula:

$$\theta_a = \frac{A_a \times h}{Q}$$

En caso que sea menor a un día se debe re calcular el área para el tiempo de retención mínimo de un día.

Remoción SST

Se utilizaron los rendimientos indicados en la Tabla 10, para lagunas anaerobias se utilizó un valor de 50%.

Remoción de DBO

El efluente de la DBO_5 se calcula multiplicando la DBO_5 de entrada por el porcentaje de remoción encontrado en función de la temperatura.

Remoción de Patógenos

Se utilizan las formulas presentadas en el diseño de lagunas de maduración.

4.3.8.3. Lagunas Facultativas (LF)

En esta se distinguen tres zonas. Una superficial aerobia donde se produce oxidación de la materia orgánica por el oxígeno que proporciona la fotosíntesis y la re aireación superficial. En la zona intermedia se presentan condiciones variables, donde predominan las bacterias facultativas, de las que toman el nombre estas lagunas y en el fondo donde se acumulan los sedimentos oxidándose la materia orgánica y los lodos por medio anaerobio. (Alamancos 1999)

El espesor de estas tres zonas varía en función del momento del día, ya que durante la noche al cesar la actividad fotosintética, decrece el espesor de la capa aerobia. El nivel de carga orgánica aplicada a la laguna afecta estos estratos, ya que en caso de que sea sobrecargada se convertirá en una laguna anaerobia. (CENTA 2006)

Son lagunas con profundidades de 1 a 2 m de profundidad, siendo 1,5 m la profundidad mínima de lagunas facultativas primarias y 1,2 m la profundidad mínima de lagunas facultativas secundarias (Rolim 2000). De forma cada vez más consolidada se viene aceptando la profundidad de 1.5 m como la idónea para el diseño.

El principal objetivo que se persigue en la etapa facultativa es la biodegradación de la materia orgánica vía aerobia con el oxígeno aportado por la actividad fotosintética de las algas. La variación diaria de la actividad fotosintética repercute directamente en el contenido de oxígeno disuelto y en el pH.

4.3.8.4. Modelo general de diseño (LF)

Lagunas facultativas son diseñadas de una forma adecuada con base en el concepto de carga superficial de DBO, λ_s (kg/ha d). El valor permisible de diseño de λ_s , el cual incrementa con la temperatura está dado por la siguiente ecuación que incluye un factor de seguridad:

$$\lambda_s = 350(1.107 - 0.002T)^{T-25}$$

Luego se procede a calcular el área superficial cubierta hasta el nivel medio de la profundidad de la laguna con la siguiente ecuación:

$$A_f = \frac{10 \cdot L_i \cdot Q}{\lambda_s}$$

Con el valor del área hasta el nivel medio de la profundidad se puede calcular el tiempo de retención hidráulico con la siguiente fórmula:

$$\theta_f = \frac{A_f \cdot h}{(2 \cdot Q_i - 0.001 \cdot e \cdot A_f)}$$

Donde,

e: evaporación neta (mm/d)

Las otras variables ya se definieron.

Para minimizar los cortos circuitos hidráulicos y dejar suficiente tiempo a las algas para multiplicarse (evitar lavado de algas) se recomienda un valor mínimo del tiempo de retención de 5 días para temperaturas menores a 20 °C, y 4 días para temperaturas ≥ 20 °C. Si esta condición cambia el tiempo de retención, debe ser recalculada el área superficial.

Remoción SST

Se utilizaron los rendimientos indicados en la Tabla 10, para lagunas facultativas se utilizó un valor de 70%.

Remoción de DBO

El efluente de la DBO₅ de una laguna facultativa se puede calcular con una constante de remoción de primer orden k_1 medida en d^{-1} con la siguiente fórmula:

$$L_e = \frac{L_i}{1 + k_1 \theta_f}$$

Donde,

$$k_{1(T)} = k_{1(20)}(1.05)^{T-20}$$

Los valores de k_1 (20) es 0.3 d^{-1} para lagunas facultativas primarias y 0.1 d^{-1} para lagunas facultativas secundarias.

L_e : es el efluente de la DBO incluyendo la DBO de las algas. Esta DBO algal es aproximadamente entre el 70 y el 90 por ciento del total de la DBO del efluente. Por consiguiente este efluente debe multiplicarse por un valor F_{na} (fracción no algal de la DBO) entre 0.1 y 0.3, con un valor usual de diseño 0.3. Finalmente el efluente de la DBO filtrada será:

$$L_e(\text{filtrada}) = F_{na}[L_e(\text{sin filtrar})]$$

Remoción de Patógenos

Se utilizan las formulas presentadas en el diseño de lagunas de maduración.

4.3.8.5. Lagunas de maduración (LM)

Son lagunas que se caracterizan por no recibir demasiada carga orgánica, ubicándose en la cola del tratamiento. Con profundidades bajas entre 0,8 y 1 m, se dan las condiciones propicias para la penetración de la radiación solar. Por estas razones son adecuadas para el desarrollo de algas, predominando la suficiencia de oxígeno y por lo tanto predominan los microorganismos heterótrofos aerobios.

El principal objetivo es conseguir un alto grado de desinfección, mediante la remoción de organismos patógenos hasta los límites requeridos para prevenir problemas de salud pública.

4.3.8.6. Modelo general de diseño (LM)

Las lagunas de maduración siempre se dimensionan en serie y todas deben tener las mismas dimensiones. El tiempo de retención de las lagunas de maduración varía entre tres y diez días o más para dos o más lagunas en serie. Para una laguna de maduración el tiempo de retención debe ser igual o mayor a cinco días. (WHO/EMRO 1987)

Con el tiempo de retención se procede a calcular el área superficial cubierta hasta el nivel medio de la profundidad con la siguiente fórmula:

$$A_m = \frac{Q \cdot \theta_m}{h}$$

θ_m : Tiempo de retención (días)

Las otras variables ya se definieron.

– Remoción SST

Se utilizaron los rendimientos indicados en la Tabla 10, para lagunas de maduración se utilizó un valor de 55%.

– Remoción de DBO

El efluente de la DBO_5 de una laguna maduración se puede calcular con una constante de remoción de primer orden k_1 medida en d^{-1} con la siguiente fórmula:

$$L_e = \frac{L_i}{1 + k_1 \theta_f}$$

Donde,

$$k_{1(T)} = k_{1(20)}(1.05)^{T-20}$$

Los valores de $k_{1(20)}$ es 0.05 d⁻¹ para lagunas de maduración, ya que la remoción es más lenta que en la lagunas facultativas.

L_e : es el efluente de la DBO incluyendo la DBO de las algas. Esta DBO algal es aproximadamente entre el 70 y el 90 por ciento del total de la DBO del efluente. Por consiguiente este efluente debe multiplicarse por un valor F_{na} (fracción no algal de la DBO) de 0.1. Finalmente el efluente de la DBO filtrada será:

$$L_e(\text{filtrada}) = F_{na}[L_e(\text{sin filtrar})]$$

– Remoción de Patógenos

Coliformes Fecales (CF)

Para estimar la cantidad de CF que salen del efluente final de una laguna o un número n de lagunas se usa la siguiente formula llamada el teorema de Marais (Marais 1974):

$$N_e = \frac{N_i}{(1 + K_b \theta)^n}$$

Dónde:

N_e : número de coliformes fecales del efluente (CF/100ml)

N_i : número de coliformes fecales del afluente (CF/100ml)

K_b : coeficiente de velocidad de remoción de CF (día⁻¹)

θ : tiempo de detención de las lagunas de estabilización (días)

El coeficiente de reducción bacteriana K_b varía de microorganismo a microorganismo y también en cadenas del mismo microorganismo, por ejemplo el valor de $K_b = 2,0$ día⁻¹ para Escherichia Coli no se aplica para la reducción de otro patógeno. K_b es muy dependiente de la temperatura y se calcula con la siguiente fórmula (Mara 1976):

$$k_{B(T)} = k_{B(20)}(\phi)^{T-20}$$

Dónde:

$K_{B(20)}$ = Constante de remoción de CF a 20°C (día⁻¹)

Φ = coeficiente fórmula de remoción de CF en lagunas

Los valores de $K_{B(20)}$ y ϕ reportados por diferentes autores se presentan en Tabla 16.

Referencia	$K_{B(20)}(\text{día}^{-1})$	ϕ
Klock (1971)	1,1	1,07
Marais (1974)	2,6	1,19
Skerry and Parker (1979)	1,5	1,06
Arceivala (1981)	1,2	1,19
Mills et al (1992)	0,7	1,17
Yanez (1993)	1,1	1,07
Mayo (1995)	1,9	1,08
Mara (2001) ¹	2,6	1,15

¹ Para $T > 20^{\circ}\text{C}$

Tabla 16. Valores reportados para $K_{B(20)}$ y ϕ

Mara recomienda $K_{B(20)} = 2.0$ y $\phi = 1.07$ para lagunas anaerobias. Marais $K_{B(20)} = 2.6$ y $\phi = 1.19$ para lagunas facultativas y de maduración.

Huevos de Helminto

La ecuación con un límite de confianza del 95% recomendada por mara (1976) y Rolim (2000) es la siguiente:

$$R = 100x[1 - 0.41e^{(-0.49t+0.0085t^2)}]$$

Dónde:

R: remoción de huevos de helmintos (%)

T: tiempo de retención (días)

4.4. Operación y mantenimiento (O&M) de sistemas naturales

Los diferentes sistemas naturales mencionados anteriormente presentan necesidades de operación y mantenimiento similares. La información considerada como la más precisa es las recomendaciones de Rolim (2000) y el manual de operación y mantenimiento de la CAR para plantas en su jurisdicción.

Los sistemas naturales constituyen uno de los procesos más eficientes que existen para el tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales. Sin embargo, por ser considerados sistemas de tratamiento sencillo, tanto desde el punto de vista operacional como constructivo, son generalmente menospreciados en cuanto a sus actividades de operación y mantenimiento. (Rolim 2000)

A continuación se citan algunas sub capítulos del manual ya mencionado.

4.4.1. Operación del Sistema de Tratamiento

Por operación se entiende las acciones que garantizan el funcionamiento adecuado del sistema hidráulico y del proceso biológico de la misma. La operación de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) contempla tanto el trabajo rutinario con frecuencia diaria, semanal o mensual, como el trabajo ocasional.

El trabajo rutinario consiste en la operación de las estructuras que determinan el funcionamiento hidráulico de la PTAR, en los muestreos y observaciones al afluente y efluente necesarios para la evaluación del funcionamiento biológico del sistema y además en la limpieza y mantenimiento de las partes que componen la PTAR.

El trabajo ocasional se refiere a la evaluación del comportamiento de la PTAR y de otros aspectos como la generación de lodos, resultante de los procesos biológicos; y elementos eléctricos de la caseta.

Las actividades operacionales se agrupan en los siguientes componentes:

4.4.1.1. Componente Sanitario

El operador de la PTAR deberá hacer un recorrido diario buscando condiciones como las siguientes:

- Partículas en número excesivo y/o flóculos que pasan sobre el rebose de los vertederos.
- Excesiva grasa y acumulación de espuma.
- Presencia de flujo en los canales de desvío a unidades paralelas, debido a problemas en las unidades de operación normal.
- Olores excesivos.
- Color anormal de las aguas residuales en varias etapas del proceso.

Las operaciones que comúnmente desarrolla este componente son:

- **Medición de Caudal**

Se realiza para garantizar un funcionamiento apropiado de la PTAR, debe estar de acuerdo con los criterios de diseño. Como medida de control, el aforo del caudal se emplea durante diferentes horas del día para determinar el tiempo de detención hidráulico promedio, mínimo y pico. Se realizarán aforos a la 6 a.m., a las 12 m y a las 6 p.m.

La medición de la cantidad de agua que entra a la PTAR se realizará utilizando un dispositivo apropiado (ej. Canaleta Parshall, canaletas venturi, etc).

- **Muestreo del Afluente y Efluente**

El muestreo del afluente y efluente es la única forma para establecer las eficiencias de remoción y funcionamiento de la PTAR. Los datos pueden ser obtenidos con base en muestras compuestas o puntuales según la investigación en ejecución. Los parámetros más utilizados son DBO5, SST, aceites y grasas, NKT y coliformes fecales.

- **Observación del Efluente**

La observación visual de la calidad del efluente da una indicación del funcionamiento de la PTAR. En una situación normal el efluente debe tener un aspecto claro, libre de lodo o sólidos en suspensión. Una sobrecarga en el sistema se manifiesta en una alta turbiedad en el efluente.

- **Muestreo y Evaluación de Lodos**

El muestreo de lodos se realiza para estimar la cantidad de lodo en el sistema, para evaluar su calidad, estabilidad, sedimentabilidad y el estado propicio para la purga de lodo y secado.

- **Control de Carga**

Constituye el método de control real del sistema, comprobando la carga volumétrica contaminante, siendo el parámetro más importante a tener en cuenta durante el desarrollo del funcionamiento de toda la PTAR. La carga se expresa en metros cúbicos de aguas residuales por día.

4.4.1.2. Operaciones del Componente Hidráulico

Consiste en la supervisión directa y continua de todo el sistema de tratamiento, con el objetivo de obtener un funcionamiento óptimo en las unidades hidráulicas que componen los procesos físicos y biológicos de la PTAR. Las actividades que comúnmente se realizan en nuestro medio son:

- **Alcantarillado y Tubería de Interconexión**

Las operaciones que comúnmente se efectúan implican entrar en los pozos de inspección para sacar los sedimentos y obstrucciones acumuladas en los conductos.

Las tuberías de interconexión se utilizan para transferir el efluente de una unidad de tratamiento a otra. Suponiendo que ambas unidades deban mantener niveles de agua distintos, estas estructuras operan con un correcto flujo hidráulico que depende de la cámara de interconexión.

- **Control del Caudal de Entrada a la PTAR**

El control se realiza leyendo el dispositivo de aforo del afluente a la PTAR. En este caso se debe seguir la curva dada en el diseño hidráulico de la PTAR para guiarnos por la cabeza de operación normal. Para regular el caudal de entrada se deben operar las válvulas o compuertas de las tuberías de entrada al sistema en la cámara de salida del tratamiento preliminar.

- **Desvíos (By Pass). Pasos Directos**

Un desvío tiene como finalidad permitir el paso del agua de una unidad o cámara a otra en un caso eventual, como en el momento de llenado o vaciado del sistema para facilitar su operación y control, cada vez que se vacía una unidad de tratamiento se debe proceder a limpiar la tubería utilizada.

- **Rejillas**

Las rejillas se constituyen en uno de los métodos más elementales para remover material grueso de las aguas residuales, siendo su principal objetivo retener basuras y todos aquellos residuos que presentan peligro para las unidades posteriores (válvulas, accesorios, etc.). La rejilla debe limpiarse cuando su colmatación causa represamiento del agua. Su frecuencia de operación será a juicio del operador de la PTAR, pero como mínimo al inicio y final de la jornada diaria.

El material retenido en las rejillas se descompone muy rápidamente produciendo olores desagradables. Este material debe recolectarse en carretillas o canecas cubiertas junto a las rejillas y retirarse diariamente o con mayor frecuencia para enterrarse controladamente en predios de la PTAR. Las paredes y las plataformas de las rejillas y las rejillas mismas deben limpiarse con chorros de manguera y mantenerse limpios. Las arenas que contengan mucha materia orgánica pueden enterrarse para impedir las molestias del olor.

- **Canales Desarenadores**

La operación de esta unidad es indispensable para evitar la acumulación de arena y demás material inerte en las unidades siguientes. De la eficiencia del desarenador depende la eficiencia en la remoción de la laguna. Cuando se vaya a efectuar el mantenimiento a un desarenador y éste tenga que salir de servicio, se recomienda antes de cerrarlo iniciar el llenado de la otra unidad para evitar un rebosamiento.

Los desarenadores están diseñados para ser limpiados manualmente. Dado que el sistema maneja aguas combinadas, estos deben limpiarse después de cada evento de precipitación fuerte. En condiciones normales de trabajo, estos desarenadores deben limpiarse cuando las arenas depositadas llenen un 50 o 60 por ciento del espacio de almacenamiento, condición por inspeccionar cuando menos cada 10 días. Un marcado olor de las arenas significa que se estará depositando demasiada materia orgánica en el desarenador y habrá que tomar medidas para esta situación, como es el caso de ajustar el vertedero control a la salida de la estructura o el lavado de las arenas.

- **Mantenimiento**

Se deben realizar tours de inspección todas las semanas alrededor de los sistemas para verificar el estado de los taludes. Los problemas encontrados deben ser corregidos inmediatamente.

- **Extracción y Manejo de Lodos**

Durante los primeros años de operación del sistema, los lodos se acumularán en el fondo. Los procesos biológicos tratarán el lodo a la misma tasa que éste se deposita, haciendo que la acumulación sea despreciable.

Una laguna de estabilización operada de manera eficiente no debería tener problemas con la acumulación de los lodos en el fondo. Sin embargo, la profundidad de los lodos depositados debe ser revisada al menos una vez cada año. Si la profundidad de los lodos alcanza una tercera parte de la profundidad de diseño de la laguna, o están a menos de 10 cm de la tubería de entrada, la laguna debe ser drenada y el lodo retirado.

4.5. Pisos térmicos en Colombia

Según el IDEAM en su manual El Medio Ambiente en Colombia los pisos térmicos, son un sistema de medida que nos permite definir la temperatura o las características climáticas de acuerdo a la altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m). Para Colombia dentro de los pisos térmicos se han definido cinco niveles denominados cálido, templado, frío, páramo y glacial como se muestra Figura 9.

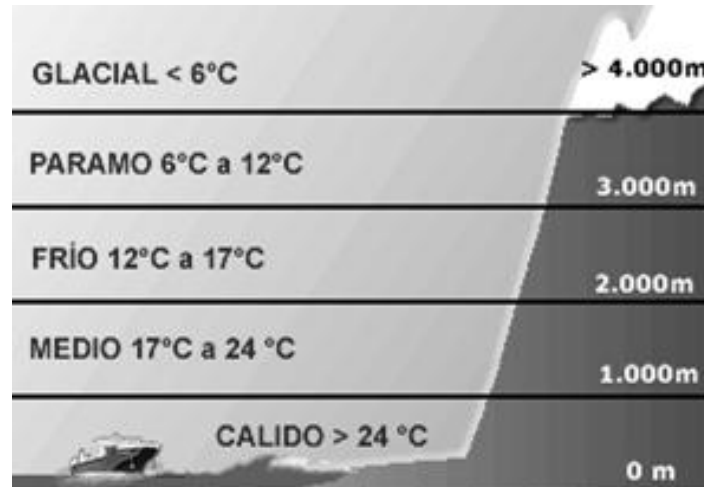


Figura 9. Esquema pisos térmicos en Colombia

Fuente: <http://www.todacolombia.com/geografia/pisostermicos.html>

4.5.1. Piso térmico cálido

Comprende zonas localizadas entre 0 y 1.000 m.s.n.m, donde se presentan temperaturas promedio superior a los 24 grados centígrados (24°C). En Colombia el 80% (913.000 Km²) del territorio nacional lo abarca este piso térmico, en las llanuras costeras tanto del Pacífico como del Caribe, en los valles del río Magdalena, Cauca, Cesar, Catatumbo y las extensas llanuras del Orinoco y el Amazonas entre otras.

4.5.2. Piso térmico templado o medio

Corresponde a zonas localizadas entre 1.000 y 2.000 m.s.n.m, donde se presentan temperaturas entre 17 y 24 °C. En Colombia este piso cubre el 10% (114.000 Km²) del territorio nacional, en las zonas bajas de las montañas.

4.5.3. Piso térmico frío

Se presenta en áreas localizadas entre 2.000 y 3.000 m.s.n.m, presentándose temperaturas que oscilan entre 12 y 17 °C. Cubriendo el 7.9 % (93.000 Km²), ubicándose en las partes altas de las montañas.

4.5.4. Piso térmico páramo

Se presenta en las zonas situadas entre los 3.000 y 4.000 m.s.n.m, presentándose temperaturas entre 6 y 12 °C. Este piso térmico ocupa el 2% (23.000 Km²) del territorio nacional, localizándose en la parte superior de la montaña.

4.5.5. Piso térmico glacial

Corresponde a las zonas con alturas superiores a los 4.000 m.s.n.m y presenta temperatura menores a los 6 °C. Con la menor superficie en el país, este piso térmico ocupa menos del 0.1% y se caracteriza por temperaturas bajas, lluvias escasas, fuertes vientos helados y nevadas frecuentes. (García 2003)

Atlas climatológico de Colombia

El Atlas Climatológico de Colombia elaborado por el IDEAM a partir de datos históricos de las estaciones meteorológicas alrededor del país presenta información de diferentes variables como precipitación, días con lluvia, temperatura, humedad, radiación y brillo solar, vientos, evaporación, entre otras para los diferentes pisos térmicos del país. A continuación se recopila la información de temperatura, precipitación y evaporación que son las variables que influyen para esta investigación.

4.5.6. Temperatura

En la Figura 10 se presenta la gráfica donde se relaciona la temperatura mínima, media y máxima con la elevación y a partir de estas relaciones fue posible deducir los valores presentados en la Figura 11.

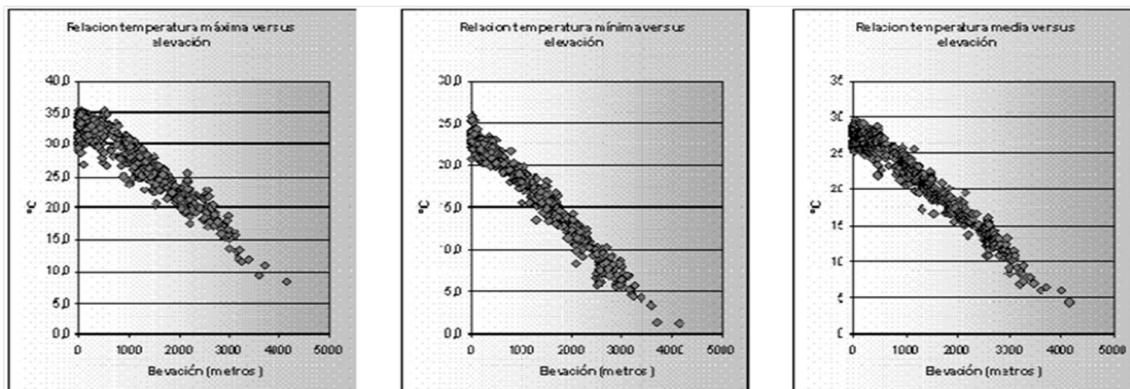


Figura 10. Relación de la temperatura con la elevación
Fuente: (IDEAM 2005)

Elevación	Temperatura Mínima Media	Temperatura Media	Temperatura Máxima Media
0	23.4	28.2	33.2
500	20.7	25.4	30.5
1000	17.9	22.6	27.7
1500	15.2	19.8	25.0
2000	12.4	17.0	22.2
2500	9.7	14.2	19.5
3000	6.9	11.4	16.7
3500	4.2	8.6	14.0
4000	1.4	5.8	11.2

Figura 11. Temperaturas aproximadas en diferente niveles altitudinales
Fuente: (IDEAM 2005)

La temperatura mínima media es la de mayor interés para esta investigación, por ser el valor utilizado en el diseño de los sistemas de tratamiento naturales.

4.5.7. Precipitación

El Atlas esquematiza el patrón general de lluvia total anual de la siguiente manera:

- Las menores lluvias se presentan en la Alta Guajira con totales de 500 mm y menos; los núcleos máximos se han registrado en la Región Pacífica con totales anuales de más de 10000 mm.
- La región Caribe registra lluvias entre 500 y 2000 mm con un gradiente muy definido en dirección Sur.
- La región Andina posee una gran diversidad pluviométrica, con lluvias relativamente escasas (hasta 2000 mm) a lo largo de la Cordillera Oriental y en los valles del Alto Magdalena y Alto Cauca. Los núcleos máximos (de 3000 a 5000 mm) en las cuencas del Medio Magdalena y Medio Cauca.
- En la Orinoquia generalmente predominan las lluvias altas de 2000 a 3000 mm en su parte central y Oriental, aun cuando hacia el piedemonte pueden observarse hasta 6000 mm y por el contrario en el extremo Norte de Arauca las lluvias pueden ser menores de 1500 mm.
- La mayor parte de la Amazonia recibe entre 3000 y 4500 mm por año, mientras que en la Región Pacífica se reciben entre 3000 y 12000 mm.

Cada rango de temperatura puede ser relacionado con rangos de precipitación y evaporación, encontrando límites para las diferentes zonas del país. De esta forma calcular la evaporación neta, la cual es la variable de diseño para los sistemas naturales.

4.5.8. Evaporación

La distribución espacial de la evaporación del país es descrita en este Atlas de la siguiente manera: los valores máximos se presentan en la zona norte, que está influenciada directamente por los sistemas subtropicales, especialmente en el departamento de La Guajira, donde los promedios anuales de la evaporación, que son los más altos del país oscilan entre 2.100 y 3700 milímetros. De manera similar sucede a lo largo de la línea del litoral (Santa Marta – Golfo de Morrosquillo), pero con valores menores entre 1.300 y 1.700 milímetros al año. En las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, se presenta un régimen dominado por el efecto de la elevación, disminuyendo los valores alrededor de los 600 milímetros por año, siendo estos los más bajos de todo el país. En la cuenca del bajo Magdalena en especial las sabanas de Córdoba, Bolívar, Cesar, Magdalena y noreste de Antioquia presentan valores cercanos a los 1.700 mm anuales. En los valles interandinos varía entre los 3.100 y los 1.500 mm por año. La evaporación tiende a disminuir en las laderas de las cordilleras, como es el caso de la sabana de Bogotá, en donde los valores oscilan entre 900 y 1.100 mm/año. Sobre la costa pacífica se registran valores menores, alrededor de los 1.000 mm anuales al igual que en la Amazonia. Los valores de la Orinoquia cercanos a 1.700 mm y en San Andrés y Providencia entre 1.500 y 1.700 mm por año.

4.6. Regiones Naturales de Colombia

Se designa región natural a cada zona geográfica de un país que cuenta con las mismas características en cuanto a relieve, clima, vegetación, y clases de suelo.

En Colombia estas diferencias regionales se definen por una serie de factores muy claros, tales como las características del relieve, la distancia al mar, el promedio de lluvias y las condiciones de suelo. De acuerdo a estas condiciones se pueden diferenciar en Colombia seis regiones naturales denominadas Amazonía, Andina, Caribe, Insular, Pacífica y Orinoquía.



Figura 12. Regiones Naturales de Colombia

Fuente: <http://www.todacolombia.com/geografia/regionesnaturales.html>

El 70 % de la población del país se concentra en la región andina, asentada en los principales centros económicos y urbanos como Bogotá, Medellín, Cali, Bucaramanga, Cúcuta, Manizales, Pereira, Armenia, Ibagué, Neiva, Popayán, Pasto y Tunja. (García s.f.)

4.7. Costos de tierra en Colombia

La Asociación Nacional de Lonjas y Colegios Inmobiliarios (ASOLONJAS) con la colaboración de su Presidente Ejecutivo Uriel Ramírez Giraldo y los directores de las lonjas afiliadas alrededor del país, se realizó una investigación del precio por metro cuadrado de tierra tanto sub urbana, expansión urbana y urbana perimetral (rural). Fueron enviadas cartas explicando la información solicitada a cada lonja afiliada donde se explicó que se necesitaba el rango (máximo y mínimo) entre el que varía el precio de tierra en las zonas ya especificadas. El resultado final obtenido por esta investigación fue el siguiente:

- Precio mínimo por metro cuadrado de tierra en Colombia: \$3.000
- Precio máximo por metro cuadrado de tierra en Colombia: \$400.000

Para efectos de esta investigación, teniendo en cuenta los sistemas objeto de análisis, estas plantas no pueden ser ubicadas en zona suburbana o de expansión urbana. Por este motivo el rango de precios debe ser el encontrado para zona urbana perimetral (rural). El rango arrojado por la investigación para esta zona es:

- Precio mínimo por metro cuadrado de tierra en Colombia: \$3.000
- Precio máximo por metro cuadrado de tierra en Colombia: \$180.000

5. Metodología

Para realizar el análisis comparativo de costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas comunidades en Colombia, se realizó una simulación donde se tuvieron en cuenta tecnologías naturales de tratamiento de AR ampliamente utilizadas alrededor del mundo. Para calcular los costos fue necesario definir las combinaciones de las tecnologías en lo que se llaman trenes de tratamiento.

5.1. Selección de trenes

Las tecnologías seleccionadas son:

- Tratamiento preliminar (T Pre):
 - Rejillas
 - Desarenador
 - Canaleta Parshall
- Tratamiento Primario:
 - Laguna anaerobia (LA)
 - Tanque séptico o de sedimentación (TS)
- Tratamiento Secundario
 - Lagunas facultativa (LF)
 - Humedal de flujo libre (HFL)
 - Humedal de flujo sub superficial (HFS)
- Tratamiento Terciario
 - Laguna de maduración (LM)

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda las lagunas de maduración como sistemas terciario cuando el efluente va a ser utilizado en agricultura o acuicultura, ya que es efectiva removiendo huevos de helminto (OMS 2006).

Estas tecnologías se combinaron para formar los trenes que serán objeto de análisis. Los trenes son los siguientes:

- Tren 0: LF -LM

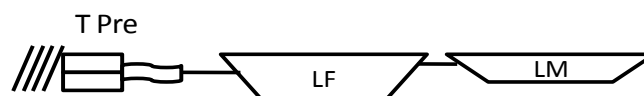


Figura 13. Esquema Tren 0

- Tren 1: LA - LF -LM

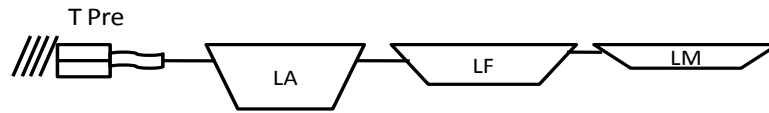


Figura 14. Esquema Tren 1

- Tren 2: LA - HFL - LM



Figura 15. Esquema Tren 2

- Tren 3: LA - HFS - LM

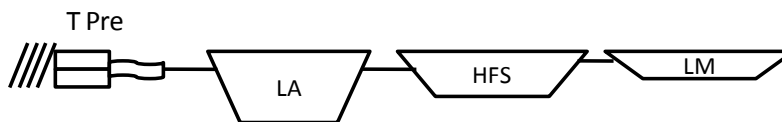


Figura 16. Esquema Tren 3

- Tren 4: LA - LF - HFL - LM

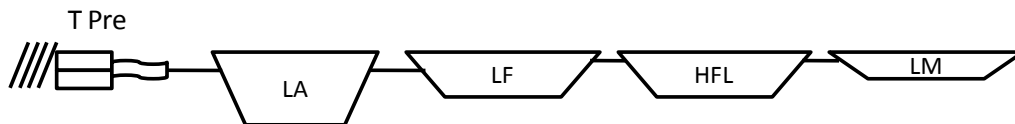


Figura 17. Esquema Tren 4

- Tren 5: LA - LF - HFS - LM

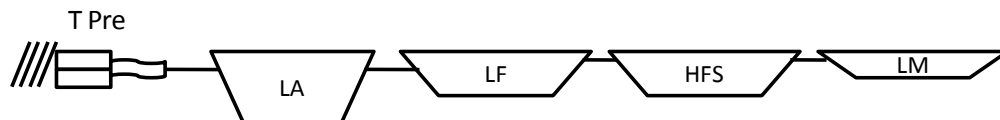


Figura 18. Esquema Tren 5

- Tren 6: LA - HFL - HFS - LM

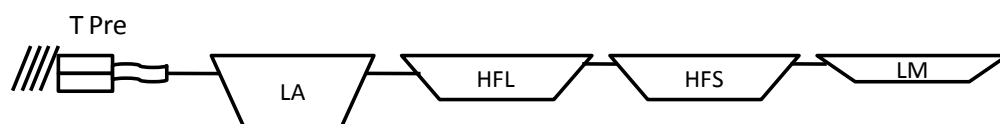


Figura 19. Esquema Tren 6

- Tren 7: LA - HFS - HFL - LM

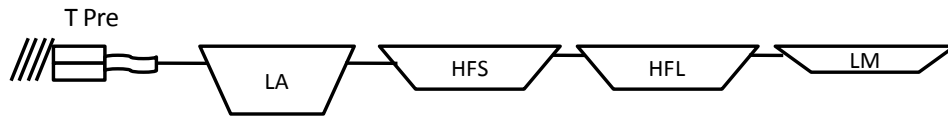


Figura 20. Esquema Tren 7

- Tren 8: TS - LF - LM

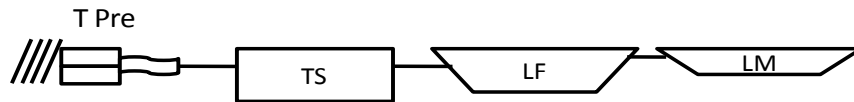


Figura 21. Esquema Tren 8

- Tren 9: TS - HFL - LM

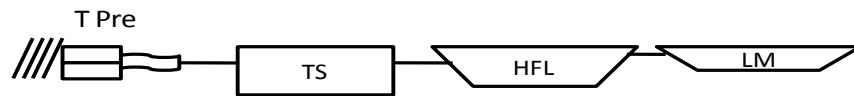


Figura 22. Esquema Tren 9

- Tren 10: TS - HFS - LM

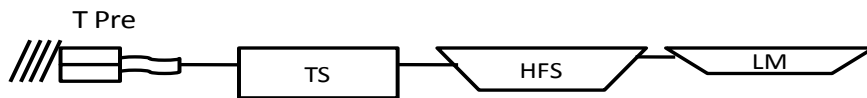


Figura 23. Esquema Tren 10

- Tren 11: TS - LF - HFL - LM

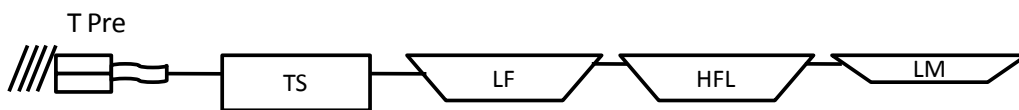


Figura 24. Esquema Tren 11

- Tren 12: TS - LF - HFS - LM

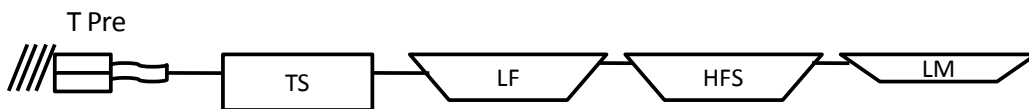


Figura 25. Esquema Tren 12

- Tren 13: TS - HFL - HFS -LM

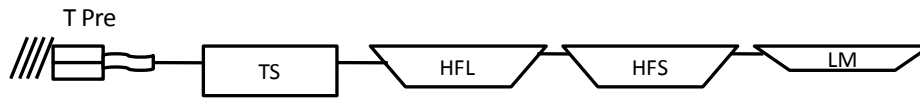


Figura 26. Esquema Tren 13

- Tren 14: TS - HFS - HFL - LM

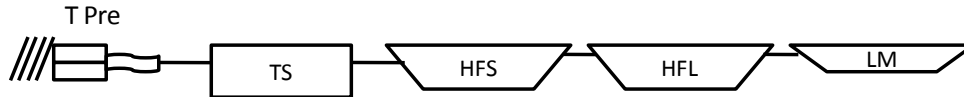


Figura 27. Esquema Tren 14

Como se puede ver anteriormente el tratamiento terciario para cada uno de los trenes es el lagunaje de maduración en serie, para remover organismos patógenos y así poder analizar cuál es el incremento del costo de inversión inicial, operación y mantenimiento relacionado con la desinfección para dejar el agua apta para reutilización en agricultura u otras actividades donde la salud pública se pueda ver afectada por la presencia de estos microorganismos.

5.2. Simulación

La simulación consistió en la elaboración de un algoritmo en el lenguaje computacional interpretado php, el cual es de libre uso. Este contiene diferentes funciones que siguen el diagrama de flujo de la Figura 28. Al finalizar estas funciones se guardan las variables de interés en una base de datos MySQL (de uso libre), donde el número de escenarios generados será explicado posteriormente.

La simulación fue realizada en el lenguaje computacional interpretado php, el cual es un software libre. El script que incluye todas las funciones en el lenguaje php, así como las instrucciones de guardado en la base de datos se muestran en el Anexo 1. En este también se presenta el script de creación de la estructura de la base de datos.

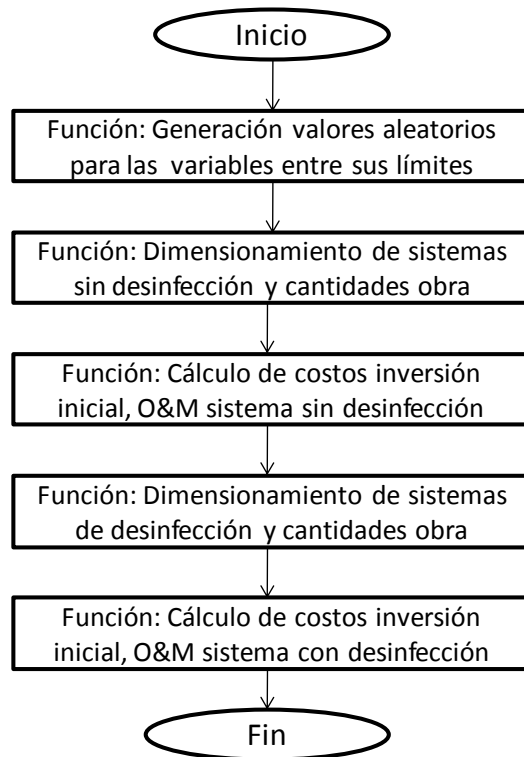


Figura 28. Diagrama de flujo programa de la simulación

5.2.1. Generación valores para las variables y sus límites

La primera función fue la encargada de generar aleatoriamente valores para las variables de entrada, requeridas para el dimensionamiento de los trenes. Cada una de estas variables con sus respectivos límites y la forma en la que se generaron son presentadas a continuación.

Para objeto de esta investigación se consideran pequeñas comunidades aquellas donde la población varía entre 500 y 30.000 habitantes equivalentes. La variable población fue generada aleatoriamente con una distribución uniforme.

Como se mostró anteriormente la temperatura media del mes más frío en el país varía según el piso térmico. En los pisos térmicos glacial y páramo se presentan las más bajas, estando los promedios mínimos por debajo de los 7 °C y presentándose en altura mayores a 3000 m.s.n.m. Estas zonas abarcan menos del 2.1 % del territorio nacional y por esta razón no serán incluidas en el análisis. El promedio más alto de la temperatura media del mes más frío se presente en el piso térmico cálido, el cual se localiza entre los 0 y los 1.000 m.s.n.m. Este piso térmico abarca el 80% del territorio nacional, y su temperatura varía entre 17.9 y 25.6 °C. Esta variable fue generada aleatoriamente con una distribución uniforme. Esta fue dividida en 3 rangos de interés para la investigación:

- Altas: $T \geq 20$ °C (máx. 26 °C)
- Medias: $12 \leq T < 20$ °C
- Bajas : $T < 12$ °C (min. 7 °C)

Para el caso de la evaporación neta se utilizaron los límites de la precipitación y la evaporación alrededor del país. Como se mostró anteriormente el rango de la precipitación en el país es de 500 a 12.000 mm por año y el de evaporación es de 600 a 3.700 mm por año. A cada uno de los rangos de temperatura fue hallado el rango de precipitación y evaporación según las series históricas del Atlas Climatológico elaborado por el IDEAM. Los valores de estas variables fueron generados entre los rango presentados en la Tabla 17 , utilizando la diferencia para encontrar la evaporación neta en la unidad de interés mm/día.

Rango T (°C)	T ≥ 20 °C		T 12-20 °C		T ≤ 12 °C	
	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.
Evaporación (mm/año)	680	2,500	796	1,772	767	1,327
Precipitación (mm/año)	453	7,883	908	4,375	641	1,530

Tabla 17. Rangos Temperatura, precipitación y evaporación.

Los límites de los parámetros de calidad del agua fueron simulados entre los rangos presentados en la Tabla 1. Rangos típicos de la composición del AR doméstica. Fuente: (Metcalf & Eddy 1991). Estos son: Sólidos suspendidos 100 - 350 mg/l, DBO₅ 110 - 400 mg/l y coliformes fecales 10⁶ y 10⁹ CF/100ml, huevos de helminto 300 – 600 N°/l (Mara 1976), dependiendo del grado de concentración de los contaminantes. El rango de la DBO per cápita fue tomado de la Tabla 2. Variación de la contribución per cápita de DBO Fuente: (Mara 1976). La simulación de esta variable fue entre 39 y 54 g/hab.d, que son los límites propuestos para Brasil el cual es el país que más se acerca a Colombia. Estas variables fueron generadas aleatoriamente con una distribución normal, con la media en el centro del rango.

5.2.2. Dimensionamiento y cantidades de obra tren de tratamiento

5.2.2.1. Dimensionamiento

Los trenes de tratamiento fueron dimensionados siguiendo los procedimientos de diferentes autores como se presentó en el capítulo 4.3, utilizando el modelo general de diseño propuesto para cada sistema.

A continuación se presentan los parámetros de entrada asumidos para cada sistema, con su respectiva referencia bibliográfica.

Tanque séptico			
Parametro		Un	Referencia
Altura =	3.0	m	Romero 2004
Tiempo de retención=	> 1	día	Romero 2004
relacion largo:ancho	1:3		EPA 2002
Kb(20) =	2	día ⁻¹	Mara 1976
φ=	1.07		Mara 1976
vol 1° compartimento	2/3 Vt		EPA 2002

Tabla 18. Parámetros de entrada asumidos para el Tanque Séptico

Laguna anaerobia			
Parametro		Un	Referencia
Altura =	4,0	m	Alamancos 1999, Mara y Pearson 1986, Gloyna y Tischler 1979
Tiempo de retención=	> 1	día	Alamancos, Mara 1976, Malina y Ríos 1976
Kb(20) =	2	día ⁻¹	Mara 1976
φ=	1,07		Mara 1976
relacion largo:ancho	1:3		Mendoça 2000

Tabla 19. Parámetros de entrada asumidos para la Laguna Anaerobia

Laguna facultativa			
Parametro		Un	Referencia
Altura =	1,5	m	Alamancos 1999, Mara y Pearson 1986, Gloyna y Tischler 1979, OMS 1987
Tiempo de retención=	≥ 5	día	para T < 20 °C Mara 1976
Tiempo de retención=	≥ 4	día	para T ≥ 20 °C Mara 1976
Fraccion algal de DBO ₅ =	70	%	Mara 1976
Kb(20) =	2,6	día ⁻¹	Marais 1974, Mara 1976
φ =	1,19		Marais 1974, Mara 1976
relacion largo:ancho	1:3		Mendoça 2000

Tabla 20. Parámetros de entrada asumidos para la Laguna Facultativa

Laguna maduracion			
Parametro		Un	Referencia
Altura =	1.0	m	Alamancos 1999, Mara y Pearson 1986, Gloyna, 1973, Ellis 1983, OMS 1987
Tiempo de retención=	> 1	día	Alamancos, Mara 1976, Malina y Ríos 1976
Tiempo de retención=	> 1	día	Alamancos, Mara 1976, Malina y Ríos 1976
Kb(20) =	2.6	día ⁻¹	Marais 1974, Mara 1976
φ =	1.19		Marais 1974, Mara 1976
relacion largo:ancho	1:3		Mendoça 2000
efluente E.coli	≤1000	CF/100ml	OMS 1989
efluente huevos	≤1	N°por litro	OMS 1989

Tabla 21. Parámetros de entrada asumidos para la Laguna de Maduración

Humedal de flujo libre			
Parametro		Un	Referencia
Altura =	0,3	m	Lara 1999
porosidad =	0,65		Lara 1999
t agua =	10,443+0,688 x T		Burgers 1982
K20	0,678	día ⁻¹	EPA 2002
relacion largo:ancho	1:2 - 1:4		Reed & Middlebrooks 1995
pendiente del lecho =	15	%	Lara 1999
factor de resistencia	6,4	(s·m ^{1/6})	Lara 1999
Kb(20) =	2,6	día ⁻¹	Marais 1974, Mara 1976
φ =	1,19		Marais 1974, Mara 1976

Tabla 22. Parámetros de entrada asumidos para el Humedal de flujo libre

Humedal de Sub superficial			
Parametro		Un	Referencia
Altura =	0,6	m	Lara 1999
porosidad =	0,38		Lara 1999
t agua =	10,443+0,688 x T		Burgers 1982
K20	1,104	día ⁻¹	EPA 2002
relacion largo:ancho	1:2 - 1:4		Reed & Middlebrooks 1995
pendiente del lecho =	15	%	Lara 1999
medio humedal	grava media		Lara 1999
Tamaño efectivo D10	32	mm	Lara 1999
Conductividad hidráulica	25000	m3/m2/d	Lara 1999
Kb(20) =	2,6	día ⁻¹	Marais 1974, Mara 1976
φ =	1,19		Marais 1974, Mara 1976

Tabla 23. Parámetros de entrada asumidos para el Humedal de flujo subsuperficial

Cabe destacar que los trenes que en su tratamiento secundario tienen dos sistemas en serie, fueron diseñados para que el primero remueva el 70 % de la carga orgánica y el segundo el 30 %.

5.2.2.2. Cantidades de obra

Después de dimensionar los trenes, el algoritmo procede a calcular las cantidades de obra, para lo cual fue necesario plantear un escenario estándar. Para este planteamiento se tuvieron en cuenta las recomendaciones de Mendoça (2000) para obtener beneficios económicos en la construcción. Estas son:

El terreno debe estar por debajo del nivel del alcantarillado, para que funcione por gravedad y no sea necesario el bombeo. Si esto no es posible, es mejor realizar el bombeo con el efluente de la laguna por tener menos sólidos, esto se logra profundizando más el nivel de las lagunas.

Para evitar excesos en el movimiento de tierras es preferible un terreno plano.

Se parte de la siguiente condición de localización de la planta:

- Topografía del terreno y nivel del alcantarillado

El terreno es relativamente plano y el nivel del alcantarillado está por encima, permitiendo el funcionamiento de todo el sistema por gravedad. Requiriendo solo la remoción de la capa vegetal para el tratamiento preliminar y la excavación de las otras estructuras hasta la profundidad especificada.

- Tipo de suelo

El terreno presenta una capa de material orgánico de máximo 30 cm que debe ser retirado.

Las unidades de tratamiento se consideraron excavadas en el suelo encontrado después de retirar la capa vegetal. Con el material retirado se conformaran diques alrededor de cada componente del tratamiento, así como barreras de protección alrededor del predio.

El material debajo de la capa vegetal permite taludes 1 : n (Vertical : Horizontal), variando n entre 0.5 y 3. Para los trenes que en su tratamiento primario presentan laguna anaerobia, fue necesario hacer un análisis específico, ya que por tener profundidad de 4 metros y sección

trapezoidal el n se ve limitado en los sistemas de menor tamaño, solo para este caso se considera el talud 1 : 0.5.

- Carretera de acceso

El sitio de proyecto tiene una carretera terciaria en estado normal que permite el adecuado transporte de maquinaria y los materiales hasta el sitio de proyecto, y este está localizado a menos de 30 km del centro urbano.

- Impermeabilización

En todos los casos se emplea geomembrana para impermeabilizar, la cual requiere de un suelo compactado en una capa de mínimo de 10 cm.

Los modelos de cantidades de obra se desarrollaron de manera independiente para cada componente del tren. También fueron sumadas en subtotales sin tener en cuenta la desinfección y las totales con desinfección con el fin de poder analizar posteriormente el impacto económico en cada tecnología en el caso de requerirse dicha desinfección. Las actividades tenidas en cuenta para cada tren de tratamiento se muestran en la Tabla 24.

- Desenlode

Para la operación y mantenimiento se considera contratar el desenlode por medio de extracción con maquinaria y disposición.

	Descripción	Unidad
1	Preliminares	
1.1	Localización y Replanteo	m ²
1.2	Campamento obra	Un
2	Excavaciones	
2.1	Descapote y limpieza	m ³
2.2	Excavaciones a mano	m ³
2.3	Excavaciones a máquina	m ³
3	Concretos	
3.1	Base concreto pobre e=0.05	m ³
3.2	Concreto 3000 PSI	m ³
3.3	Concreto 3000 PSI impemeabilizado	m ³
3.4	Refuerzo acero 60000 PSI figurado	kg
4	Carpintería Metálica	
4.1	Rejilla en acero a 36 Diam. 3/8" y separación de 1"	kg
5	Impermeabilización	
5.1	Compactación material existente	m ³
5.2	Geomembrana	m ²
6	Rellenos	
6.1	Conformación diques material en sitio	m ³
7	Interconexión	
7.1	Tubería Alcantarillado	m
7.2	Gaviones piedra 4"	m ³
7.3	Tubería perforada	m
7.4	Obras de arte de interconexión 80x80	un
8	Obras exteriores	
8.1	Cerramiento planta malla eslabonada	m
8.2	Cunetas aguas lluvias	m
8.3	Afirmado y compactado vías	m ²
8.4	Empradización	m ²
9	Conformación humedal	
9.1	Material de sustrato	m ³
9.2	Vegetación	Un
9.3	Grava 3/4 -1"	m ³

Tabla 24. Ítems o actividades considerados para el cálculo de cantidades de obra

A continuación se presentan las actividades tenidas en cuenta para cada componente del tren de tratamiento:

- Pre tratamiento

Con las dimensiones encontradas en la función de dimensionamiento de los sistemas, teniendo en cuenta el esquema mostrado en la Figura 29 se calculan las cantidades de obra de las siguientes actividades:

- Replanteo (m²)

- Descapote (m³)
- Excavación manual (m³)
- Base concreto pobre e=0.05 (m³)
- Concreto 3000 PSI loza (m³)
- Concreto 3000 PSI impermeabilizado (m³)
- Acero de refuerzo (Kg)
- Rejilla en acero (Kg)

- Laguna

Con las dimensiones encontradas en la función de dimensionamiento de los sistemas, teniendo en cuenta el esquema mostrado en la Figura 31 se calculan las cantidades de obra de las siguientes actividades:

- Replanteo (m²)
- Descapote (m³)
- Excavación a mano (m³)
- Excavación a máquina (m³)
- Compactación suelo existente (m³)
- Geomembrana (m²)
- Conformación diques material en sitio (m³)
- Tubería conexión (m)
- Tubería perforada (m)
- Obras interconexión (un)

- Tanque Séptico

Con las dimensiones encontradas en la función de dimensionamiento de los sistemas, teniendo en cuenta el esquema mostrado en la se calculan las cantidades de obra de las siguientes actividades:

- Replanteo (m²)
- Descapote (m³)
- Excavación a mano (m³)
- Excavación a máquina (m³)
- Base concreto pobre e=0.05 (m³)
- Estructuras en concreto impermeabilizado (m³)
- Acero de refuerzo (Kg)
- Tubería conexión (m)
- Obras interconexión (un)

- Humedal de flujo libre

Con las dimensiones encontradas en la función de dimensionamiento de los sistemas, teniendo en cuenta el esquema mostrado en la Figura 32 se calculan las cantidades de obra de las siguientes actividades:

- Replanteo (m^2)
- Descapote (m^3)
- Excavación a mano (m^3)
- Excavación a máquina (m^3)
- Compactación suelo existente (m^3)
- Geomembrana (m^2)
- Conformación diques material en sitio (m^3)
- Tubería conexión (m)
- Tubería perforada (m)
- Obras interconexión (un)
- Gaviones piedra 4" (m^3)
- Tubería perforada (m)
- Sustrato material orgánico (m^3)
- Vegetación (un) (Ver Figura 34)

- Humedal de subsuperficial

Con las dimensiones encontradas en la función de dimensionamiento de los sistemas, teniendo en cuenta el esquema mostrado en la Figura 33 se calculan las cantidades de obra de las siguientes actividades:

- Replanteo (m^2)
- Descapote (m^3)
- Excavación a mano (m^3)
- Excavación a máquina (m^3)
- Compactación suelo existente (m^3)
- Geomembrana (m^2)
- Conformación diques material en sitio (m^3)
- Tubería conexión (m)
- Tubería perforada (m)
- Obras interconexión (un)
- Gaviones piedra 4" (m^3)
- Sustrato Grava $\frac{3}{4}$ " - 1" (m^3)
- Vegetación (un) (Ver Figura 34)

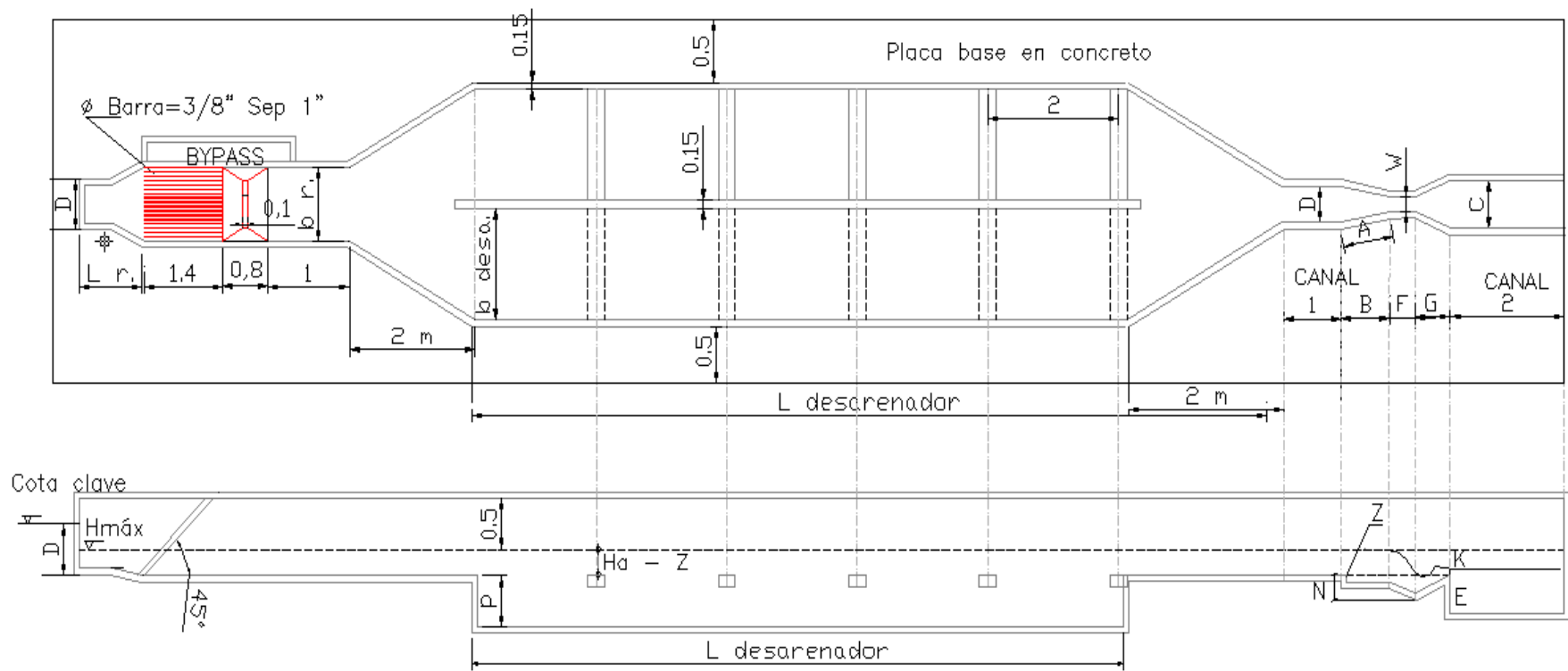


Figura 29. Esquema dimensionamiento tratamiento preliminar (Rejillas, desarenador y canaleta Parshall)

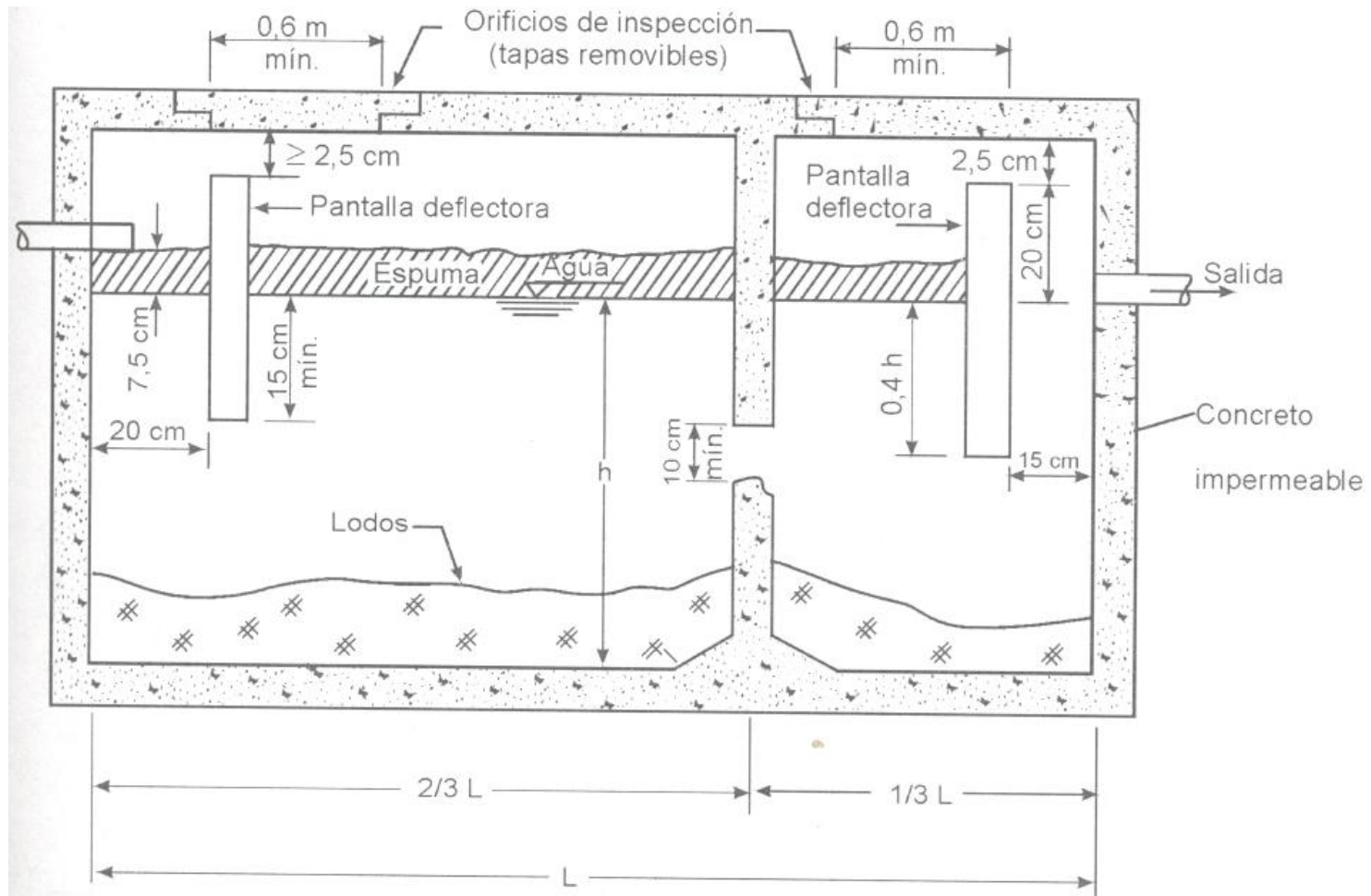


Figura 30. Esquema dimensionamiento Tanque séptico
Fuente: (Romero 2004)

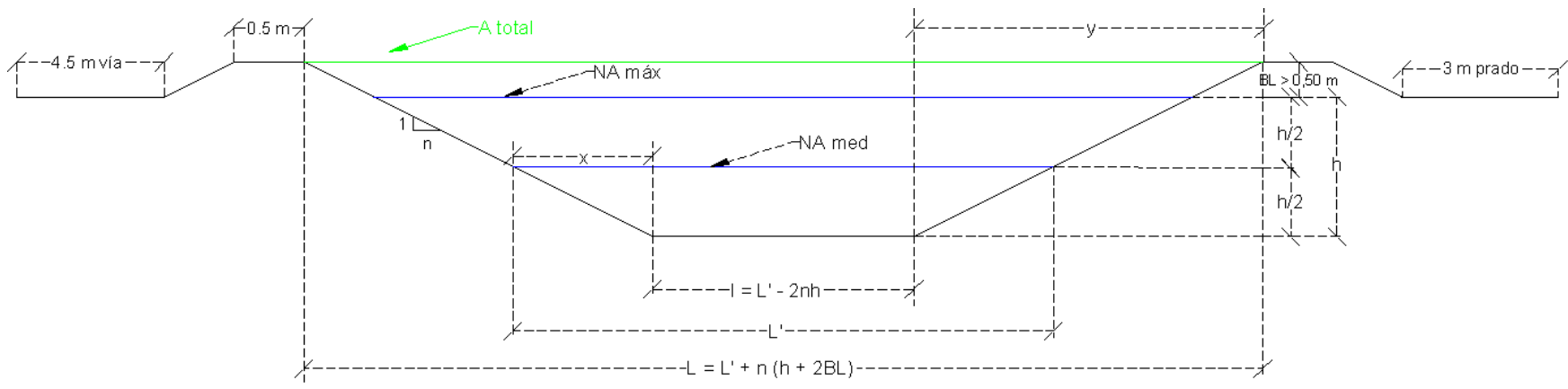


Figura 31. Esquema dimensionamiento lagunas

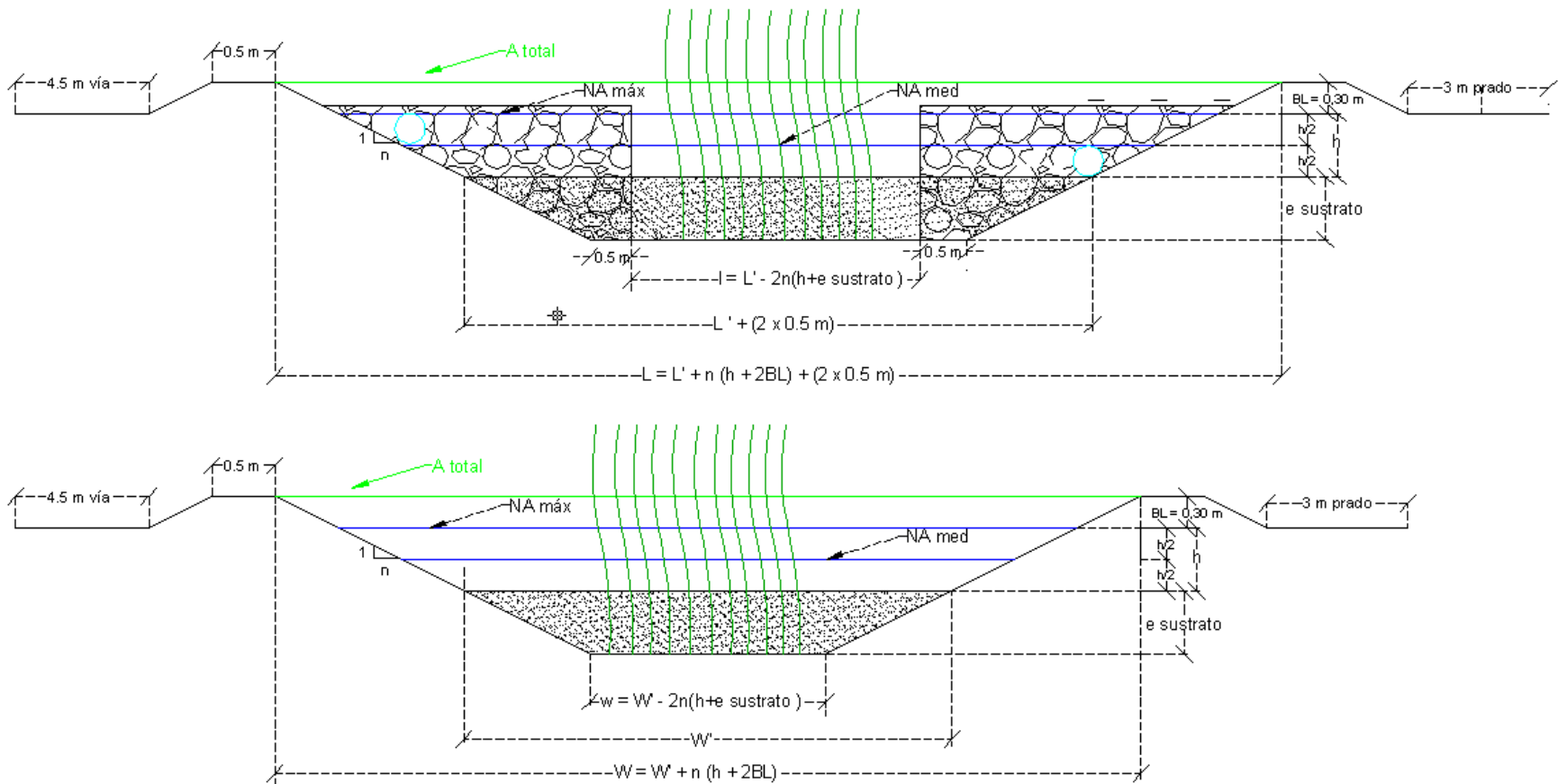


Figura 32. Esquema dimensionamiento HFL

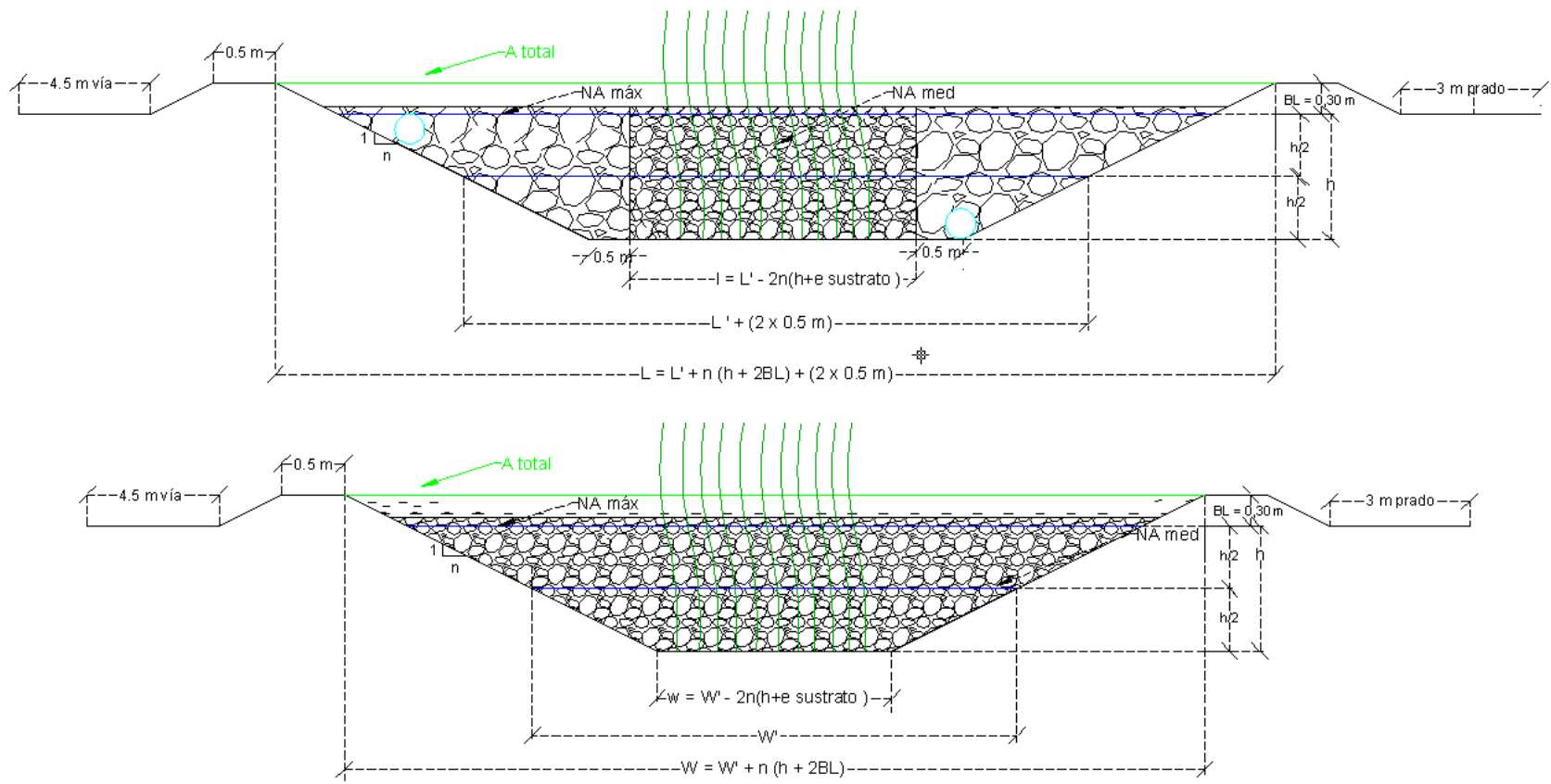


Figura 33. Esquema dimensionamiento HFS

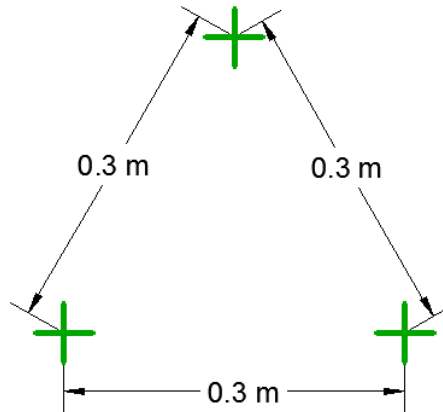


Figura 34. Distribución “tres bolillos” vegetación humedales

Por último la función encargada de calcular las cantidades de obra realiza el cálculo del área requerida por cada componente del tren. Se sumó el área total mostrada en cada figura y la requerida por el dique perimetral. Para los sistemas divididos en celdas el dique que las divide es compartido.

Para el cálculo de las cantidades de obra exteriores tales como: cerramiento de la planta, cunetas aguas lluvias, afirmado y compactado de vías y empradización fue necesario plantear un esquema básico de la planta de tratamiento. Este esquema se puede ver en la Figura 35.

Con las cantidades de obra de cada componente, subtotales (sin desinfección) y totales (con desinfección) calculadas el algoritmo procede con la función encargada de calcular los costos de inversión inicial, O & M siguiendo el procedimientos y los criterios descritos a continuación.

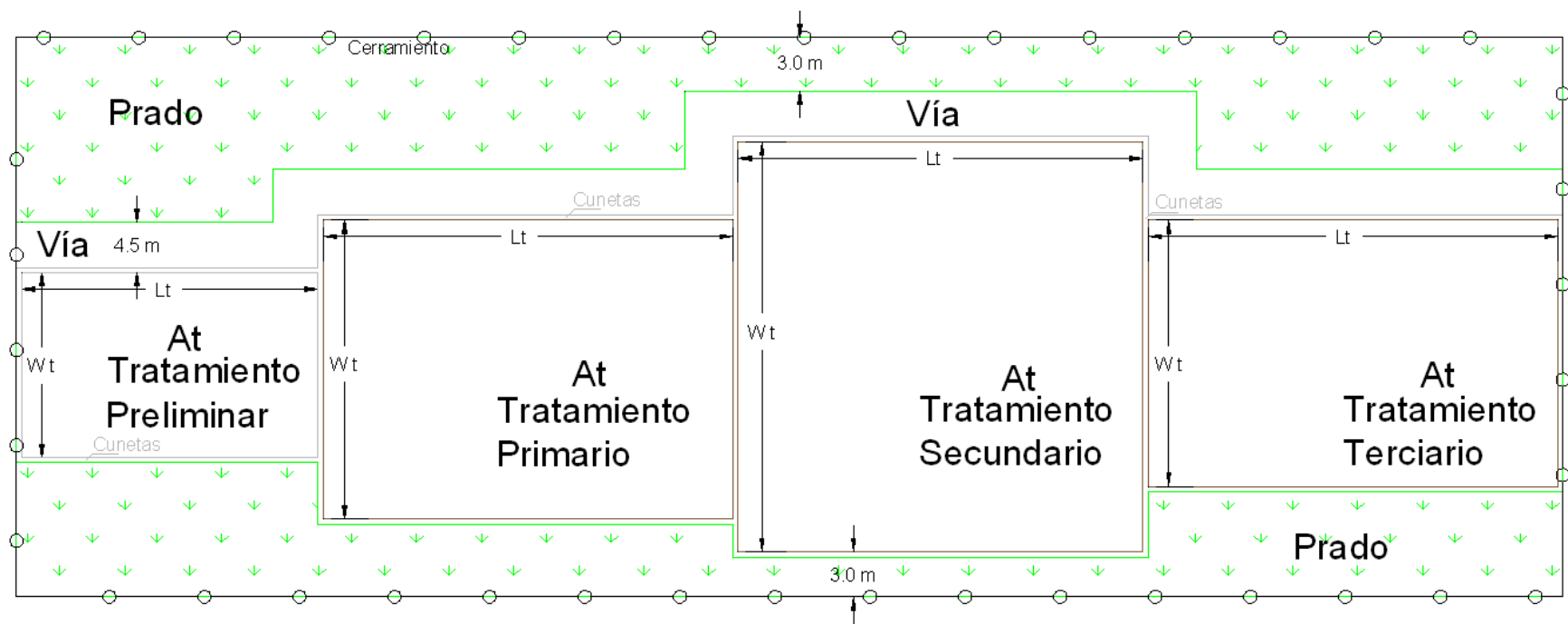


Figura 35. Esquema básico planta de tratamiento

5.2.3. Cálculo de costos de inversión inicial O, & M

5.2.3.1. Costos de inversión inicial

Para el cálculo de los costos de inversión inicial se definieron rangos entre los que varían los precios unitarios de las actividades ya mencionadas anteriormente. Se identificaron las diferentes regiones que conforman el territorio nacional (Véase Figura 12), de esta forma se pudo realizar una investigación dividida por zonas que presentan similitudes en los costos de las actividades de interés.

Para cada una de estas regiones se investigó por diferentes medios los precios unitarios de las actividades. Se utilizó el software informático para la construcción CONSTRUADATA, el cual cuenta con base de datos para las ciudades de Bogotá, Medellín, Barranquilla y Cali actualizada trimestralmente. Las bases de datos utilizadas para esta investigación fueron la versión de Junio de 2011. Se utilizó la base de datos de la gobernación de Risaralda, disponible en su página de internet en la dependencia de infraestructura, versión Febrero 2011. También fue suministrada información por empresas de ingeniería, las cuales se describirán a continuación:

- PAVCO S.A.

La compañía Pavco S.A. especializada en la producción y comercialización de geosintéticos Pavco para obras de ingeniería y tubosistemas Pavco para transportar especialmente agua. La información suministrada fueron las listas de precios actualizadas para los distribuidores alrededor del país.

- CONSULTORES Y CONSTRUCTORES ASOCIADOS CUATRO S.A

Empresa de ingeniería dedicada principalmente a la ejecución de estudios, diseños, construcción e interventoría de obras civiles en sector público y privado. Concentrando sus actividades en la región andina, exactamente en los departamentos de Caldas, Risaralda y la ciudad de Bogotá. Esta será referenciada como empresa de ingeniería # 2 de aquí en adelante.

- QUETZAL ENERGY Ltd. - COLOMBIA

Es una empresa de exploración y explotación petrolera Canadiense con sede en Colombia y Guatemala. Con operaciones en el Departamento de Casanare en los municipios de Maní y Monterrey, zona con alta concentración de explotación minera y petrolera, presentando costos elevados en materiales, maquinaria y mano de obra. Esta será referenciada como empresa de ingeniería # 3 de aquí en adelante.

Teniendo esta información se procedió a hacer un análisis por cada actividad por separado, prestando especial atención y detalle a las actividades de mayor influencia. Para identificar estas actividades de mayor influencia se calculó la estructura de costos usando los precios unitarios promedio de CONSTRUADATA complementado con la información suministrada por empresas de ingeniería. Los resultados de este promedio se presentan en la Tabla 25. En esta también se muestran con un (*) las actividades que tienen un porcentaje de influencia mayor al

5 % en la estructura de costos, esto con el fin de hacer una análisis de mayor rigurosidad a las actividades de mayor influencia.

	Descripción	Unidad	APU CD(Bogotá)	APU CD(Medellín)	APU CD(Cali)	APU CD(B/quilla)	PROMEDIO	
1.0	Preliminares							
1.1	Localización y Replanteo	m ²	\$ 1,838	\$ 1,828	\$ 1,802	\$ 1,858	\$ 1,831	*
1.2	Campamento obra	Un	\$ 1,291,681	\$ 1,196,824	\$ 1,337,913	\$ 1,556,850	\$ 1,345,817	
2.0	Excavaciones							
2.1	Descapote y limpieza	m ³	\$ 16,620	\$ 16,287	\$ 14,953	\$ 16,620	\$ 16,120	*
2.2	Excavaciones a mano	m ³	\$ 11,387	\$ 11,387	\$ 11,387	\$ 11,387	\$ 11,387	
2.3	Excavaciones a máquina	m ³	\$ 18,240	\$ 17,907	\$ 16,573	\$ 18,240	\$ 17,740	*
3.0	Concretos							
3.1	Base concreto pobre e=0.05	m ³	\$ 227,522	\$ 167,144	\$ 182,707	\$ 188,899	\$ 191,568	
3.2	Concreto 3000 PSI impemeabilizado	m ³	\$ 386,925	\$ 312,925	\$ 329,425	\$ 333,635	\$ 340,727	*
3.3	Concreto 3000 PSI	m ³	\$ 295,464	\$ 240,487	\$ 256,987	\$ 261,197	\$ 263,534	
3.4	Refuerzo acero 60000 PSI figurado	Ton	\$ 2,979,193	\$ 2,979,193	\$ 2,979,193	\$ 2,979,193	\$ 2,979,193	*
4.0	Carpintería metálica							
4.1	Rejilla en acero a 36 Diam. 3/8" y separación de 1"	Ton	\$ 5,327,804	\$ 5,327,804	\$ 5,327,804	\$ 5,327,804	\$ 5,327,804	
5.0	Impermeabilización							
5.1	Compactación material existente	m ³	\$ 5,825	\$ 5,195	\$ 4,745	\$ 5,195	\$ 5,240	
5.2	Geomembrana	m ²	\$ 15,427	\$ 15,427	\$ 15,427	\$ 15,427	\$ 15,427	*
6.0	Rellenos							
6.1	Conformación diques material en sitio	m ³	\$ 8,410	\$ 7,360	\$ 6,610	\$ 7,360	\$ 7,435	
7.00	Interconexión							
7.10	Tubería Alcantarillado 4"	m	\$ 17,174	\$ 17,174	\$ 17,174	\$ 17,174	\$ 17,174	
7.11	Tubería Alcantarillado 6"	m	\$ 27,525	\$ 27,525	\$ 27,525	\$ 27,525	\$ 27,525	
7.12	Tubería Alcantarillado 8"	m	\$ 38,396	\$ 38,396	\$ 38,396	\$ 38,396	\$ 38,396	
7.13	Tubería Alcantarillado 10"	m	\$ 60,580	\$ 60,580	\$ 60,580	\$ 60,580	\$ 60,580	
7.14	Tubería Alcantarillado 12"	m	\$ 90,408	\$ 90,408	\$ 90,408	\$ 90,408	\$ 90,408	
7.15	Tubería Alcantarillado 14"	m	\$ 108,197	\$ 108,197	\$ 108,197	\$ 108,197	\$ 108,197	
7.16	Tubería Alcantarillado 16"	m	\$ 136,429	\$ 136,429	\$ 136,429	\$ 136,429	\$ 136,429	
7.20	Gaviones entrada y salida piedra 4"	m ³	\$ 115,903	\$ 93,353	\$ 112,603	\$ 123,603	\$ 111,366	
7.30	Tubería Perforada Alcantarillado 4"	m	\$ 21,669	\$ 21,669	\$ 21,669	\$ 21,669	\$ 21,669	
7.31	Tubería Perforada Alcantarillado 6"	m	\$ 32,019	\$ 32,019	\$ 32,019	\$ 32,019	\$ 32,019	
7.32	Tubería Perforada Alcantarillado 8"	m	\$ 42,890	\$ 42,890	\$ 42,890	\$ 42,890	\$ 42,890	
7.33	Tubería Perforada Alcantarillado 10"	m	\$ 65,074	\$ 65,074	\$ 65,074	\$ 65,074	\$ 65,074	
7.34	Tubería Perforada Alcantarillado 12"	m	\$ 94,903	\$ 94,903	\$ 94,903	\$ 94,903	\$ 94,903	
7.35	Tubería Perforada Alcantarillado 14"	m	\$ 112,692	\$ 112,692	\$ 112,692	\$ 112,692	\$ 112,692	
7.36	Tubería Perforada Alcantarillado 16"	m	\$ 140,923	\$ 140,923	\$ 140,923	\$ 140,923	\$ 140,923	
7.40	Obras de arte de interconexión 80x80	un	\$ 440,919	\$ 416,806	\$ 428,717	\$ 396,256	\$ 420,675	
8.0	Obras exteriores							
8.1	Cerramiento planta malla eslabonada	m	\$ 81,831	\$ 68,447	\$ 75,026	\$ 76,177	\$ 75,370	*
8.2	Cunetas aguas lluvias	m	\$ 33,949	\$ 30,650	\$ 31,640	\$ 31,893	\$ 32,033	*
8.3	Afirmado y compactado vías	m ²	\$ 56,510	\$ 34,337	\$ 55,026	\$ 59,297	\$ 51,293	*
8.4	Empradización	m ²	\$ 2,781	\$ 2,781	\$ 2,781	\$ 2,781	\$ 2,781	
9.0	Conformación humedal							
9.1	Material de sustrato	m ³	\$ 9,417	\$ 9,417	\$ 9,417	\$ 9,417	\$ 9,417	
9.2	Vegetación	Un	\$ 10,000	\$ 1,205	\$ 1,205	\$ 1,205	\$ 3,403	
9.3	Grava 3/4 -1"	m ³	\$ 67,046	\$ 42,846	\$ 67,046	\$ 75,846	\$ 63,196	*

Tabla 25. Promedio Principales Ciudades Base de datos CONSTRUDATA
* Actividades con porcentaje de incidencia mayor al 5% del presupuesto total

Por último se realizaron cotizaciones de insumos y materiales en diferentes municipios de las regiones ya mencionadas para complementar lo encontrado y ratificar que se está teniendo cuenta las principales zonas del país. La información faltante básicamente era de la región

Amazonía, Caribe, Pacífica y la parte sur y norte de la región Andina, por esta razón se escogieron municipios de estas zonas. Se llamó a ferretería y distribuidores de los municipios de Mocoa y Puerto Asis (Putumayo), Tumaco (Nariño), Santa Marta (Magdalena), Valledupar (Cesar), Montería (Córdoba), Quibdó (Chocó), Tame (Arauca) y Ocaña (Santander). El resumen de la información encontrada se muestra en el Anexo 2. El mapa de Colombia con los puntos analizados dentro de las diferentes regiones se muestra en la Figura 36.

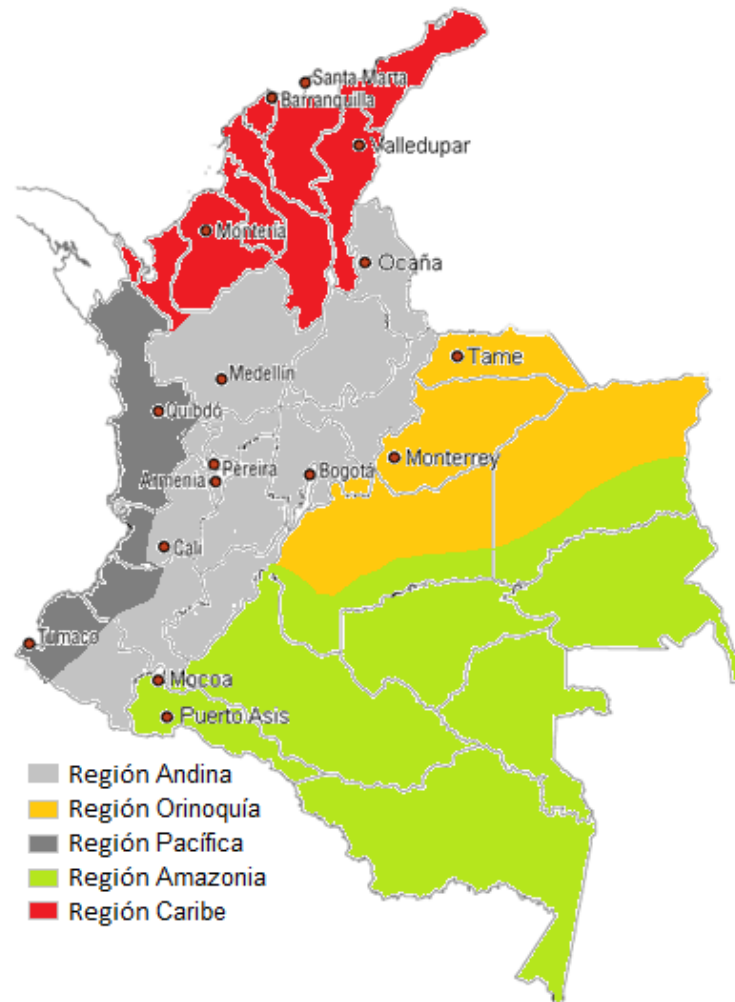


Figura 36. Mapa Regiones y municipios con puntos analizados

Esta información fue consolidada en cuadros de análisis de precios unitarios para cada municipio. Para la mano de obra se utilizaron las bases de datos de CONSTRUDATA de las 4 principales ciudades ya mencionadas, la base de datos de la gobernación de Risaralda, las tarifas actualizadas y vigentes para el año 2011 de la resolución 747 del Ministerio del Transporte y cotizaciones aportadas por la empresa de ingeniería # 2 para Bogotá y el eje cafetero y # 3 para Monterrey, Casanare. En la Tabla 26 se muestra el resumen de lo anteriormente mencionado.

Fuente	CARGO	Oficial	Ayudante entendido	Ayudante raso	Topógrafo	Cadenero
Construdata	Valor día	\$86,247.35	\$53,589.50	\$38,046.53	\$57,971.65	\$36,439.34
	Valor hora	\$10,780.92	\$6,698.69	\$4,755.82	\$7,246.46	\$4,554.92
Empresa de ingeniería # 2	Valor día	\$60,294.50	\$53,589.50	\$30,213.20	\$56,410.00	\$39,487.00
	Valor hora	\$7,536.81	\$6,698.69	\$3,776.65	\$7,051.25	\$4,935.88
Empresa de ingeniería # 3	Valor día	\$138,939.50	\$112,820.00	\$90,256.00	\$130,871.20	\$109,435.40
	Valor hora	\$17,367.44	\$14,102.50	\$11,282.00	\$16,358.90	\$13,679.43

Tabla 26. Resumen costo Mano de obra

En el Anexo 3 se puede ver el análisis detallado de mano de obra de CONSTRUDDATA. En el Anexo 4 se muestra el análisis detallado de mano de obra suministrados por la empresa de ingeniería # 2. En el Anexo 5 se muestra el análisis detallado de mano de obra suministrados por la empresa de ingeniería # 3. Esta última por ser de una zona con alta concentración de explotación de minerales y petróleo son considerados para esta investigación como la mano de obra más costosa del país.

Organizando toda la información investigada como se mencionó anteriormente, se elaboraron análisis de precios unitarios para diferentes municipios y ciudades abarcando todas las regiones del país. Se encontró el máximo y el mínimo de cada actividad, y el porcentaje de variación de este respecto al más bajo. El resumen de estos resultados se presentan en la Tabla 27, en esta también se presenta el factor de mayoración máximo que va a ser aplicado a cada actividad. Los análisis de precios unitarios de cada municipio analizado se presentan del Anexo 6 al Anexo 10, estos se presentan por regiones con su respectivo porcentaje de variación con respecto al más bajo del país.

En la simulación se generó un porcentaje de afectación aleatorio con distribución normal. Este porcentaje será la afectación a cada factor de variación de cada actividad, es decir el factor de mayoración presentado en la Tabla 27 será multiplicado por el porcentaje de afectación generado, donde 0 % indicara que el factor de mayoración será 1 y 100% indicara que el factor de mayoración será el máximo de cada actividad.

	Descripción	Unidad	MIN	MAX	%	factor MAX
1.0	Preliminares					
1.1	Localización y Replanteo	m ²	\$ 1,636	\$ 2,467	51%	1.51
1.2	Campamento obra	Un	\$ 913,946	\$ 1,752,791	92%	1.92
2.0	Excavaciones					
2.1	Descapote y limpieza	m ³	\$ 11,707	\$ 29,270	150%	2.50
2.2	Excavaciones a mano	m ³	\$ 11,387	\$ 34,199	200%	3.00
2.3	Excavaciones a máquina	m ³	\$ 12,747	\$ 30,439	139%	2.39
3.0	Concretos					
3.1	Base concreto pobre e=0.05	m ³	\$ 167,144	\$ 273,480	64%	1.64
3.2	Concreto 3000 PSI impemeabilizado	m ³	\$ 301,460	\$ 576,996	91%	1.91
3.3	Concreto 3000 PSI	m ³	\$ 240,487	\$ 405,862	69%	1.69
3.4	Refuerzo acero 60000 PSI figurado	Ton	\$ 2,473,383	\$ 3,395,034	37%	1.37
4.0	Carpintería metálica					
4.1	Rejilla en acero a 36 Diam. 3/8" y separación de 1"	Ton	\$ 4,292,069	\$ 7,895,850	84%	1.84
5.0	Impermeabilización					
5.1	Compactación material existente	m ³	\$ 4,288	\$ 8,388	96%	1.96
5.2	Geomembrana	m ²	\$ 13,890	\$ 23,967	73%	1.73
6.0	Rellenos					
6.1	Conformación diques material en sitio	m ³	\$ 5,912	\$ 11,160	89%	1.89
7.0	Interconexión					
7.10	Tubería Alcantarillado 4"	m	\$ 16,056	\$ 20,517	28%	1.28
7.11	Tubería Alcantarillado 6"	m	\$ 26,407	\$ 30,868	17%	1.17
7.12	Tubería Alcantarillado 8"	m	\$ 37,278	\$ 41,739	12%	1.12
7.13	Tubería Alcantarillado 10"	m	\$ 59,462	\$ 63,923	8%	1.08
7.14	Tubería Alcantarillado 12"	m	\$ 89,291	\$ 93,751	5%	1.05
7.15	Tubería Alcantarillado 14"	m	\$ 107,080	\$ 111,541	4%	1.04
7.16	Tubería Alcantarillado 16"	m	\$ 135,311	\$ 139,772	3%	1.03
7.20	Gaviones entrada y salida piedra 4"	m ³	\$ 91,136	\$ 181,831	100%	2.00
7.30	Tubería Perforada Alcantarillado 4"	m	\$ 19,625	\$ 31,179	59%	1.59
7.31	Tubería Perforada Alcantarillado 6"	m	\$ 29,976	\$ 41,530	39%	1.39
7.32	Tubería Perforada Alcantarillado 8"	m	\$ 40,847	\$ 52,400	28%	1.28
7.33	Tubería Perforada Alcantarillado 10"	m	\$ 63,031	\$ 74,585	18%	1.18
7.34	Tubería Perforada Alcantarillado 12"	m	\$ 92,859	\$ 104,413	12%	1.12
7.35	Tubería Perforada Alcantarillado 14"	m	\$ 110,649	\$ 122,202	10%	1.10
7.36	Tubería Perforada Alcantarillado 16"	m	\$ 138,880	\$ 150,434	8%	1.08
7.40	Obras de arte de interconexión 80x80	un	\$ 367,017	\$ 654,411	78%	1.78
8.0	Obras exteriores					
8.1	Cerramiento planta malla eslabonada	m	\$ 49,262	\$ 120,027	144%	2.44
8.2	Cunetas aguas lluvias	m	\$ 30,650	\$ 57,627	88%	1.88
8.3	Afirmado y compactado vías	m ²	\$ 34,337	\$ 61,593	79%	1.79
8.4	Empradización	m ²	\$ 2,566	\$ 4,717	84%	1.84
9.0	Conformación humedal					
9.1	Material de sustrato	m ³	\$ 7,478	\$ 22,338	199%	2.99
9.2	Vegetación	Un	\$ 1,183	\$ 10,000	745%	8.45
9.3	Grava 3/4 -1"	m ³	\$ 42,846	\$ 87,182	103%	2.03

Tabla 27. Resumen rango de variación análisis de precios unitarios en Colombia, % de variación y factor de mayoración máximo.

5.2.3.2. Costos de O&M

Para el cálculo de los costos de operación y mantenimiento de los sistemas naturales objeto de análisis se tuvieron en cuenta diferentes fuentes. El libro “Sistemas de lagunas de estabilización” de Sergio Rolim Mendoça (2000), El manual de operación y mantenimiento para lagunas de estabilización de la CAR (2005), Tesis doctoral “Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades en Colombia” de Jhoniers Gilberto Guerrero Erazo (2003), y otras fuentes como el ingeniero Luis Alberto Jaramillo quien estuvo como ingeniero de coordinación para la O&M de 24 plantas de tratamiento en la jurisdicción de la CAR (2005).

Los costos de O&M se dividieron en tres categorías. i) Costos directos de personal, ii) Otros costos directos de actividades y materiales y iii) Costos indirectos de administración. Para cada uno de estos se realizaron tablas para el cálculo de costos. Esta se elaboró para todos trenes en diferentes escenarios de DBO₅, Temperatura, carga orgánica per cápita y población. De estas tablas se sacaron gráficas para las diferentes categorías de costos en función de la población. Todo con el fin de elaborar regresiones que representen estos costos para los diferentes trenes, teniendo en cuenta la variación en la población, carga orgánica per cápita y DBO₅. Los parámetros tenidos en cuenta y asumidos se describen a continuación para cada costo:

– Costos directos de personal

La cantidad de personas necesarias para el control adecuado de los sistemas naturales se establece en función de celdas que componen el sistema y su área total.(Rolim 2000)

El criterio para el cálculo de los costos directos de personal se realizó tomando como guía la Tabla 28, adaptada del libro sistemas de lagunas de estabilización de Sérgio Rolim Mendoça.

Personal	Población (hab)			
	<10,000	10,000-20,000	20,000-50,000	50,000-100,000
Administración				
Ingeniero sanitario	-	¼	½	1
Secretaria	-	¼	½	1
Auxiliar/mensajero	-	½	1	1
Conductor	-	½	1	1
O&M				
Ingeniero jefe	¼	¼	½	1
Químico	-	¼	¼	½
Laboratorista	¼	½	½	1
Operador del turno 08-16 h	1	1	1	1
Operador del turno 16-24 h	-	-	-	1
Operador del turno 24-08 h	-	-	-	-
Trabajador peón	2	3	3-6	6-8

Tabla 28. Personal necesario para la O&M de sistemas naturales
Fuente: Adaptada de Mendoça (2000)

La información contenida en la tabla anterior se contrastó con las Tesis doctoral “Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades en Colombia” de Jhoniers Guerrero, 2003. Los modelos propuestos por este autor se encuentran dentro de los órdenes de magnitud de la Tabla 28.

Los salarios tenidos usados para el cálculo de los costos de personal fueron asignados teniendo como referencia las tarifas actualizadas y vigentes para el año 2011 de la Resolución 747 del Ministerio de Transporte, “Por la cual se establecen los topes máximos para sueldos y demás gastos que se pueden pagar en los contratos de consultoría...”. Estos salarios fueron afectados por un factor multiplicador de 2, el cual tiene en cuenta los costos administrativos de la empresa que prestará los servicios de operación y mantenimiento. Según documento del fondo financiero de proyectos de desarrollo (FONADE 2007), el factor multiplicador (FM) está formado por los siguientes componentes del costo:

- Costos de personal
- Prestaciones sociales
- Costos indirectos de la compañía, costos de perfeccionamiento, impuestos y timbres del contrato
- Honorarios

La descripción de los modelos para los tiempos y salarios del personal utilizados en esta investigación se explica a continuación:

El equipo que opera el sistema natural está compuesto siempre de un supervisor (operador) y uno o más ayudantes, en función de la magnitud y partes constitutivas del sistema. El supervisor responsable por el funcionamiento deberá poseer conocimientos básicos sobre la operación y mantenimiento de estos sistemas. Los ayudantes realizan las actividades instruidas por el supervisor, cumpliendo con labores de mantenimiento en los taludes, limpieza de las rejillas, desarenadores, vertederos, dispositivos de entrada, de salida, y la regulación de los flujos, medición de los caudales horarios, además del cuidado del paisaje y la urbanización de toda el área de tratamiento. Los sistemas con un caudal menor a 4 l/s requieren de un turno de 12 horas del operador los 365 días del año, mientras que los sistemas con un caudal mayor a 4 l/s requieren de un turno de 24 horas del operador los 365 días del año. Los sistemas de menos de 10,000 habitantes requiere de 2 ayudantes tiempo completo, los de 10,000-20,000 habitantes requiere 3 ayudantes tiempo completo, los de mayor a 20,000 habitantes requiere 4 ayudantes tiempo completo. El salario tenido en cuenta para el operador es de 3 salarios mínimos mensuales legales vigentes (SMMLV) y para los ayudantes de 1 SMMLV.

También se requieren visitas periódicas de un ingeniero de coordinación, requiriendo también la inclusión del costo del vehículo de transporte para las visitas. El tiempo de las visitas es de 4 horas por semana. El salario tenido en cuenta es de un ingeniero categoría 4 el cual tiene un sueldo de 8 SMMLV, y es un profesional con mínimo 6 años de experiencia profesional y mínimo 4 año de experiencia específica. El costo del transporte para la visitas se divide en costo del vehículo y el salario del conductor. El costo por día del vehículo con un cilindraje de 1300 - 2000 c.c. es de \$140,000 pesos incluido el salario del conductor, distribuido en 2 visitas por día.

En todo sistema de tratamiento debe llevarse un control de los procesos involucrados, con el propósito de garantizar la eficiencia en la cantidad proyectada, debe ser realizado con parámetros de resultados inmediatos para asegurar una reacción pronta del operador. Para el control de calidad y proceso anteriormente mencionado se requiere un laboratorista (técnico en muestreo) y un profesional químico. Los modelos para el personal de control de calidad del agua y control del proceso de tratamiento son el mismo para todos los trenes y las formulas son (Guerrero 2003):

$$\text{Químico: } TS = 8.86 Q^{0.15}$$

Técnico laboratorio

$$Q < 4\text{ l/s}$$

$$TS = 26.57 Q^{0.15}$$

$$Q > 4\text{ l/s}$$

$$TS = 17.71 Q^{0.15}$$

Donde,

TS= tiempo en horas por semana requeridas

Q= caudal de la planta (l/s)

El salario tenido en cuenta para el profesional químico y el técnico de laboratorio es de 3 SMMLV.

En Colombia existe la necesidad de vigilancia las 24 horas para evitar el robo de las rejillas u otros componentes de la planta, por tal motivo se contemplan dos turnos de vigilancia de 12 horas cada uno. El salario tenido en cuenta para el vigilante es de 2.5 SMMLV.

– **Otros costos directos (Materiales y actividades O&M)**

En estos costos se encuentran las herramientas e insumos o materiales de diferentes actividades, como el aseo, jardinería, análisis de aguas y actividades de desenlode.

Para el aseo, jardinería y demás actividades de mantenimiento se estimaron un número de herramientas en función del tamaño de la planta. Estas herramientas junto a la dotación de los ayudantes de operación fueron cotizadas en ferreterías. La herramientas/insumos y materiales cotizados se presentan en el Anexo 11.

De acuerdo a la legislación colombiana vigente decreto 1595 de 1984 todo sistema de tratamiento de aguas residuales debe presentar a la autoridad ambiental competente caracterización de control, a fin de verificar la eficiencia de tratamiento de la instalación. El RAS 2000 en su capítulo E.2.4 establece los parámetros mínimos de calidad del agua que deben medirse. Dice " Para la caracterización de aguas residuales debe procederse, para cada descarga importante, a realizar por lo menos cinco jornadas de medición y muestreo horario de

24 horas de duración..." Para todos los sistemas deben medirse oxígeno disuelto, DBO₅ (Soluble y total), sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, DQO (Soluble y total), Nitrógeno total, Fosforo total (Soluble y particulado), pH y Acidez. Para los sistemas con nivel de complejidad Medio alto (poblaciones 12.501 - 60.000) deben medirse además los cloruros, aceites y grasas, Coliformes (fecales y totales) y detergentes. Estos paquetes de ensayos fueron cotizados con los laboratorios de la Pontificia Universidad Javeriana e Ivonne Bernier Laboratorio LTDA ambos en Bogotá. El resumen de esta investigación se presenta en el Anexo 12.

En los costos de análisis de agua también se tuvo en cuenta el envío de las muestras desde cualquier lugar de Colombia. Este se cotizó con Servientrega, una de las empresas más reconocidas en materia de recolección, transporte, almacenamiento y distribución de mercancías a nivel nacional. El cual es llamado destino especial y tiene un costo de \$32.600 por envío.

– **Costos indirectos**

Estos costos tienen por objeto garantizar el funcionamiento de la planta de tratamiento, mediante la organización eficiente de labores del personal, compra de insumos, atención a usuarios, recepción de quejas, manejo contable y recaudo de tarifas. Estos costos incluyen: personal administrativo y gastos generales. Se utilizó el modelo (Guerrero 2003):

Costos personal administrativo

$$\text{Administrador} = TS = 6.29 Q^{0.78}$$

Si el tiempo es mayor de 40 horas por semana, el administrador tendrá tiempo completo y el resto de horas serán asignadas a un auxiliar de administración, aunque si el tiempo es mayor de 80 horas solamente se tendrá en cuenta un auxiliar de contabilidad. El sueldo del administrador es de 3 SMMLV y el del auxiliar de 2 SMMLV.

Gastos generales

Estos representan aproximadamente el 20 % del total de los gastos de personal administrativo (Guerrero 2003)

Se utilizó el software de estadística R para obtener regresiones de los costos de personal, costo de materiales y actividades de operación y mantenimiento y costos indirectos en función de las variables que mejor se ajustaran. Las regresiones para los diferentes trenes se presentan del Anexo 13 al Anexo 26.

Teniendo el costo total de operación y mantenimiento por año se procedió a calcular el costo total para 20 años en pesos constantes. El costo total del proyecto se calculó como la suma entre el costo total de construcción, el costo de la tierra y el valor total del costo de operación y mantenimiento a 20 años en pesos constantes.

5.2.4. Definición del número de iteraciones

Para definir el número de iteraciones se realizó un análisis de la dispersión de los datos encontrados. Se calculó la sumatoria de los costos totales de los trenes de tratamiento al final de cada iteración. Este resultado fue grabado en la base de datos, y se fue revisando la desviación estándar de los datos obtenidos. Todo con el fin de encontrar el punto donde esta desviación estándar empezó a variar en un porcentaje mínimo. El resultado de este análisis se presenta en el Gráfico 1 el análisis de toda la simulación y en el Gráfico 2 en detalle el comportamiento hasta la iteración 50,000 donde se empieza a ver una variación más estable.

La variación entre la desviación estándar se estabilizó en un valor menor al 0.1 % después de la iteración 300,000, esto permitió constatar que a partir de este momento la dispersión entre los datos empezó a ser estable por tener ya un contenido importante de datos entre sus rangos. Teniendo en cuenta esto se decidió hacer 1 millón de iteraciones, valor superior al punto analizado anteriormente.

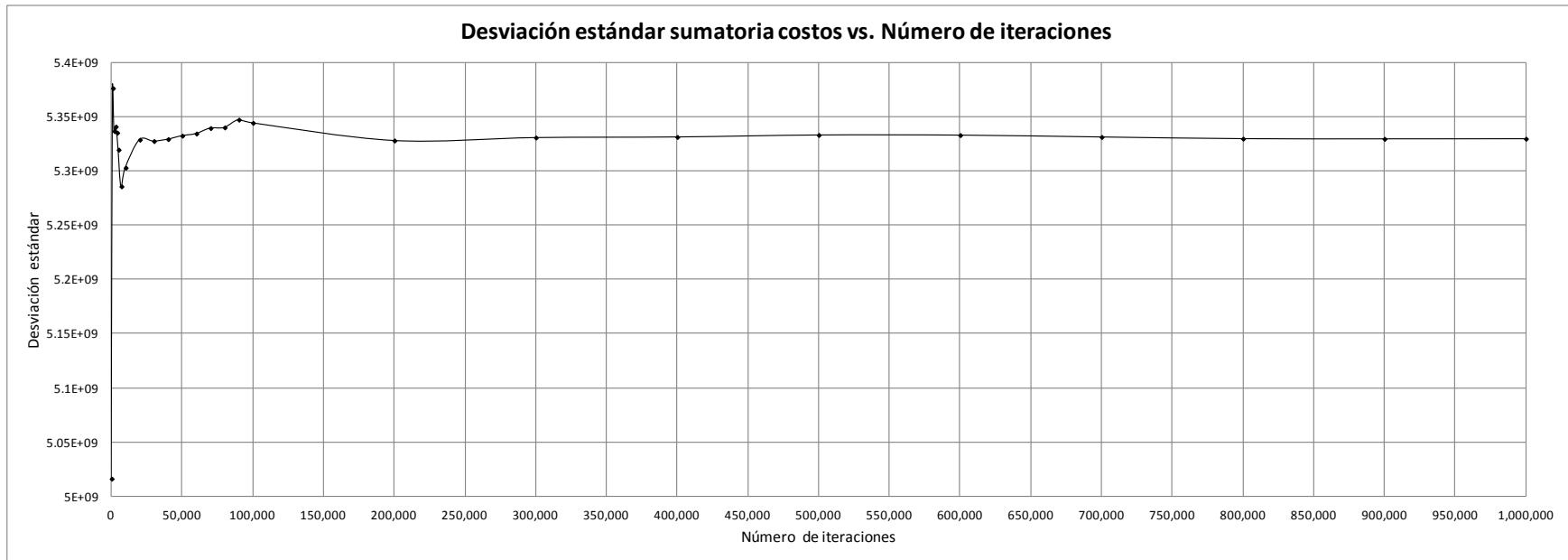


Gráfico 1. Variación desviación estándar suma total costos trenes vs. Numero de iteraciones (0 – 1,000,000)

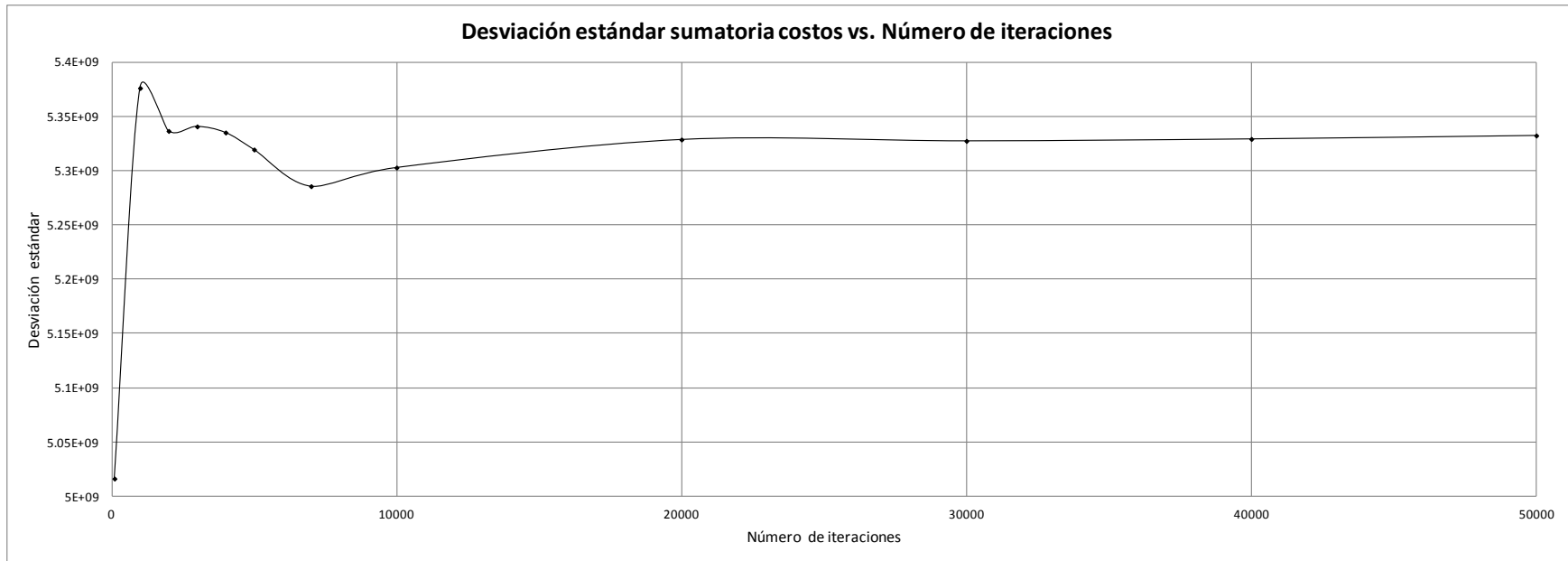


Gráfico 2. Variación desviación estándar suma total costos trenes vs. Numero de iteraciones (0-50,000)

6. Análisis de Resultados

Una vez expuesta toda la metodología y los procesos realizados se presentan los análisis de resultados, comenzando por costos generales. Luego se presentan específicamente las categorías de los costos generales para al final hacer análisis detallados de algunas variables y comportamientos de los costos.

En los análisis de costos generales se presentan gráficos con todo el conjunto de datos para los diferentes trenes en las dos categorías: Costos de inversión inicial y costos de O&M a 20 años, en pesos constantes. Estos se hicieron para sistemas sin desinfección y con desinfección. En los específicos se analizan las diferentes categorías que componen cada costo general, es decir los costos de inversión inicial se divide en costos directos o de construcción y costo del terreno mínimo requerido y los costos de O&M a 20 años se divide en costos directos de personal, otros costos directos de actividades y materiales y costos indirectos de administración. Los análisis detallados analizan cuales son las variables de mayor influencia para las categorías ya mencionadas de cada costo. Así como el comportamiento de los costos totales en diferentes escenarios de climatología y parámetros de calidad del agua.

Es importante resaltar que estos análisis buscan es hacer un comparativo entre trenes de tratamiento y no arrojar el valor exacto del costo total de la planta, ya que no se incluyeron en los análisis cosas como la caseta de vigilancia/oficina de la planta, ni los costos indirectos del proyecto como el AIU (Administración, imprevisto y utilidad), ni la interventoría entre otras por considerarlos inherentes a la tecnología.

Para efectos de estos análisis se usan las siguiente abreviaciones en las gráficas para los sistemas: Laguna anaerobia (LA), Tanque séptico o de sedimentación (TS), Lagunas facultativa (LF), Humedal de flujo libre (HFL), Humedal de flujo sub superficial (HFS), Laguna de maduración (LM).

6.1. Análisis Generales

Los análisis generales y específicos se presentan en gráficos llamados 'Diagramas de caja'. Este un gráfico representativo de las distribuciones de todo el conjunto de datos para los diferentes trenes de tratamiento. En la construcción de este gráfico se usan las siguientes cinco medidas descriptivas de los mismos: mediana, percentil 25, percentil 75, valor máximo, valor mínimo y valores atípicos. Estas se identifican como:

- Mediana: Percentil 50. Divide la distribución en dos partes iguales. De este modo, 50% de los datos están por debajo de la mediana y 50% por encima.
- Percentil 25: Por debajo de este valor se encuentra como máximo el 25% de los datos.
- Percentil 75: por debajo de este valor se encuentran como máximo el 75% e lo datos.
- Valor máximo: Es el extremo superior, los valores por encima de este límite se consideran atípicos.
- Valor mínimo: Es el extremo inferior, los valores por debajo de este valor se consideran atípicos.

- Valores atípicos: Valores que están apartados del conjunto de datos. Para efectos de estos análisis estos valores no fueron incluidos en las gráficas.

En el Gráfico 3 se presentan los costos de inversión inicial para los diferentes trenes sin desinfección. Estos costos corresponden a la suma entre los costos directos de construcción y el costo del terreno mínimo requerido. En el podemos ver que existe una diferencia importante en los costos de los trenes con tanque séptico en el tratamiento primario respecto a los trenes que tiene laguna anaerobia, aunque el comportamiento es igual en las diferentes combinaciones. Esto se debe los métodos de diseño empleados, ya que para ambos se utilizan un tiempo de retención de 1 día y al ser la laguna anaerobia más profunda requiere de menos área teniendo costos de área menores y además a la utilización de concreto reforzado impermeabilizado en los tanques sépticos, lo cual eleva los costos directos de construcción para estos trenes. La desventaja que presenta la laguna anaerobia frente a los tanques sépticos es la generación de malos olores a los alrededores, por esta razón a pesar de que la laguna es más económica el tanque es una opción para escenarios donde la planta solamente pueda ser ubicada cerca de alguna población y sea necesario prevenir la generación de olores.

En el gráfico también encontramos que el tren que solamente cuenta con una laguna facultativa primaria presenta unos costos elevados, asemejándose su comportamiento al de los sistemas con tanque séptico en el tratamiento primario. Este comportamiento es debido al diseño de la laguna facultativa primaria, ya que este debe conservar una carga superficial de DBO para evitar que esta se convierta en anaerobia, aumentando así el tamaño y elevando los costos. El sistema laguna anaerobia laguna facultativa resulta más eficiente, resultado similar al de Duncan Mara en su libro “Domestic Wastewater Treatment in developing countries”, donde muestra con ejemplos de calculo que un sistema de laguna anaerobia laguna facultativa es más eficiente que solo la laguna facultativa, ya que requiere de menos área para tener la misma eficiencia de remoción de DBO₅.

Este grafico también muestra de forma general que los sistemas que tienen laguna anaerobia en su tratamiento primario y humedal en el secundario presentan la media más baja, así como el percentil 25. Esto permite concluir de forma general que estos son los sistemas más económicos, ya que tiene el percentil 75 y el límite máximo más bajo entre todos los trenes de tratamiento. Este mismo comportamiento se ve en los sistemas que tienen tanque séptico en su tratamiento primario y humedal en el secundario aunque como se mencionó anteriormente los trenes con laguna anaerobia en el tratamiento primario presenta costos menores a los de tanque séptico.

Los trenes que en su tratamiento secundario tienen dos sistemas en serie fueron diseñados en función de la carga orgánica que debe ser removida (70 % la facultativa y 30 % el humedal). Estos muestran en general un costo menor respecto al tren que en su tratamiento secundario solamente tiene laguna facultativa, mostrando que los humedales son sistemas que pueden mejorar la eficiencia y disminuir los costos de inversión inicial. De igual manera se observa que los trenes que tienen dos sistemas de humedales en serie tienen costos menores que los que incluyen laguna y humedal cuando el tratamiento primario es una laguna anaerobia mientras que los costos son muy similares cuando el tratamiento primario es tanque séptico.

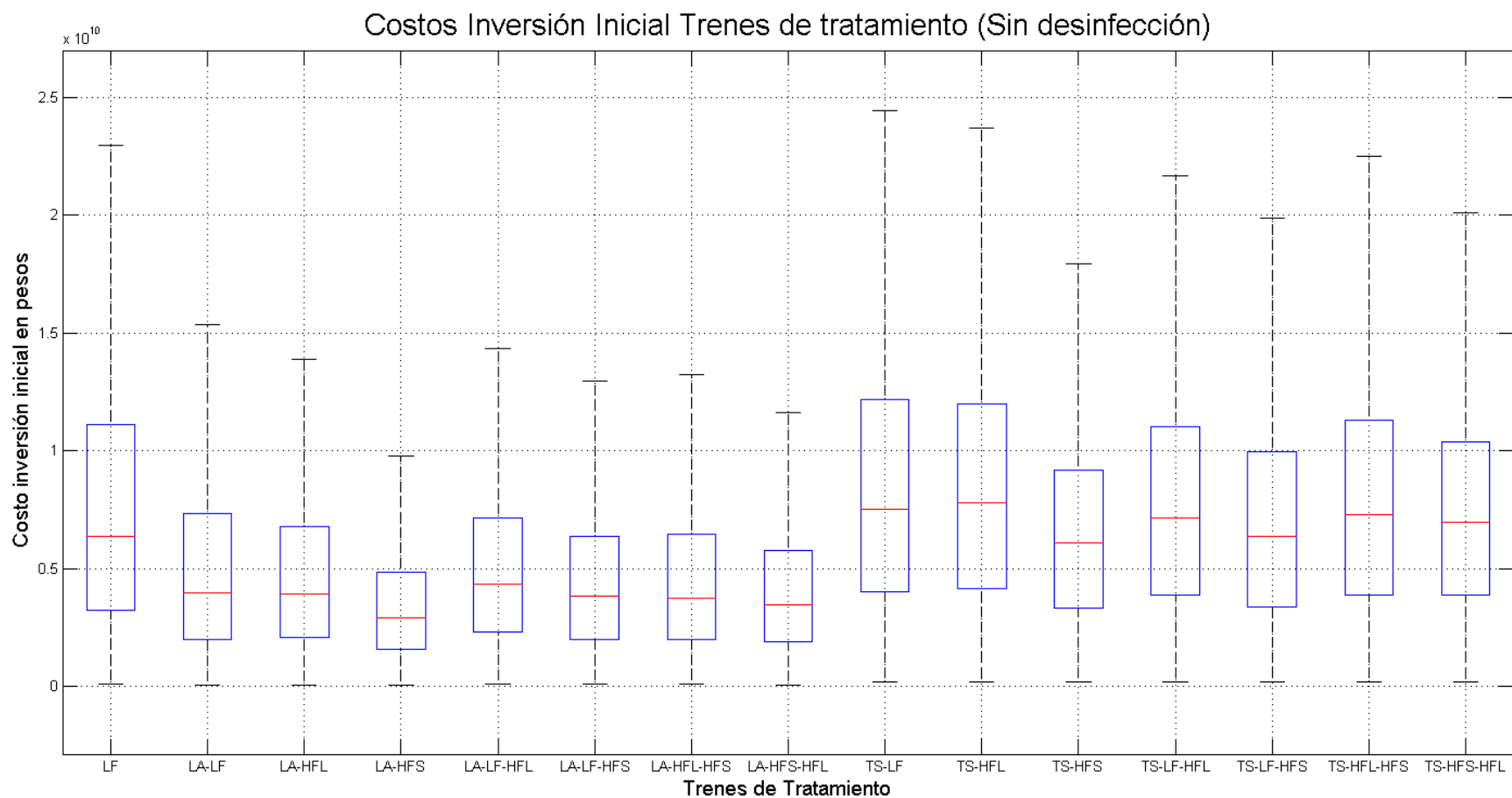


Gráfico 3. Costo inversión inicial trenes de tratamiento sin desinfección

El tren laguna anaerobia humedal de flujo subsuperficial presenta los menores costos de inversión inicial entre todos los trenes. Para los trenes que en su tratamiento primario tiene tanque séptico, la combinación con humedal de flujo subsuperficial es el que presenta los menores costos entre estos. Esto indica que el humedal de flujo subsuperficial es el sistema más eficiente en el tratamiento secundario.

Es importante resaltar que este es un aspecto general del conjunto de datos y más adelante en los análisis detallados y específicos se mostrará cuáles son los factores que influyen en este comportamiento.

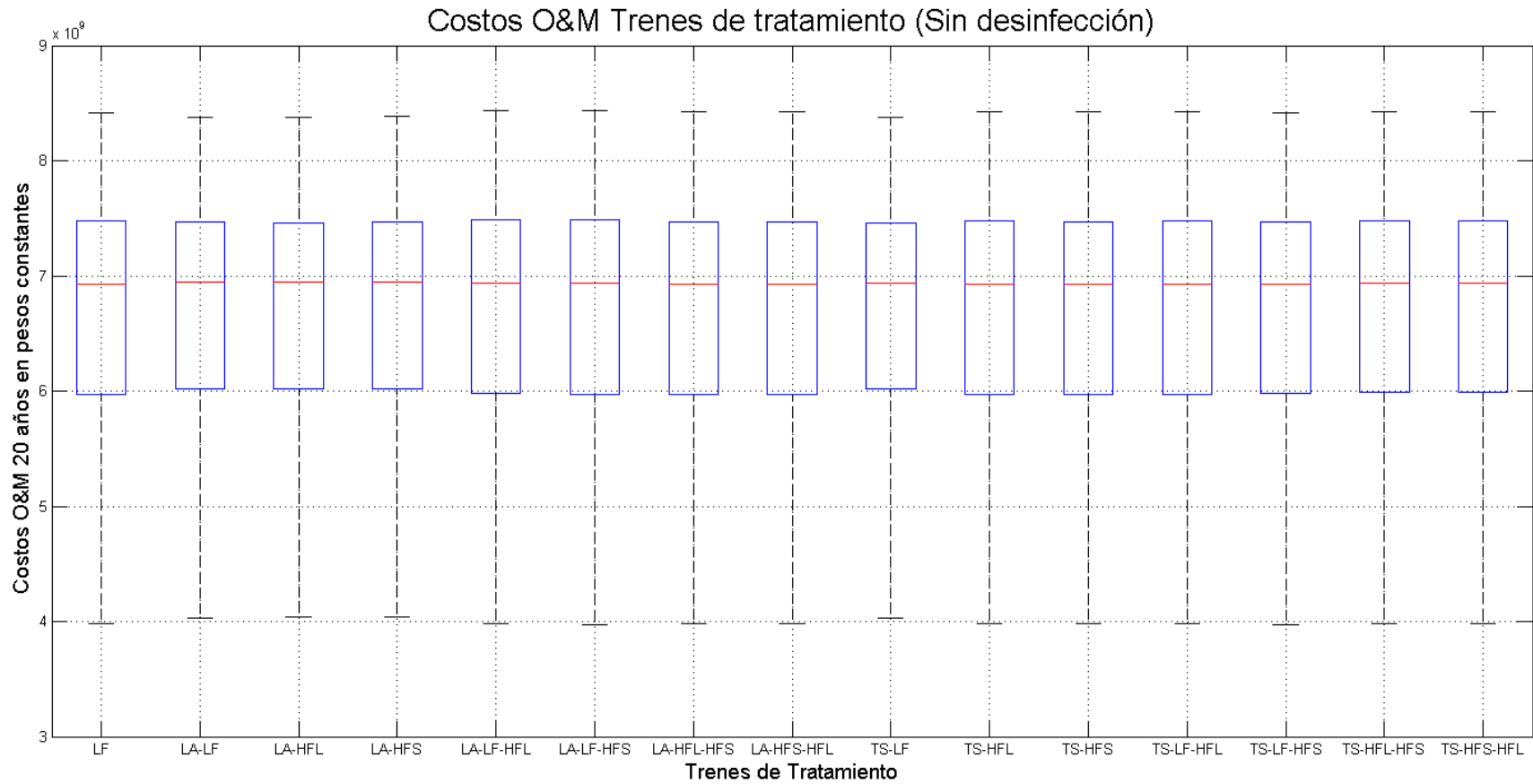


Gráfico 4. Costo O&M 20 años trenes de tratamiento sin desinfección

En el Gráfico 4 se presentan los costos de O&M para los diferentes trenes de tratamiento sin desinfección. Estos costos como se mencionó anteriormente están divididos en tres categorías: costos directos, otros costos directos y costos indirectos. Como se puede ver en el gráfico los costos de O&M en pesos constantes a 20 años son muy similares para los diferentes trenes de tratamiento.

Esto radica en que los costos directos e indirectos son iguales entre trenes y solamente varían los otros costos directos correspondientes a materiales y actividades de O&M, el cual tiene diferencia entre los trenes dependiendo del sistema. La diferencia encontrada son actividades de desenlode y algunos materiales y herramientas. Estas diferencias se muestran en los análisis específicos de estas categorías.

Es importante destacar que a los humedales generalmente no se les hace desenlode entre las actividades de operación y mantenimiento, aunque como se puede ver en la gráfica esto no tiene un mayor impacto.

En el Gráfico 5 se presentan los costos de inversión inicial de los trenes de tratamiento con desinfección. La desinfección fue diseñada por medio de laguna de maduración al final de cada tren. En estos se ven comportamientos diferentes a los sistemas sin desinfección, ya que los trenes que tienen humedal presentan en general costos superiores. Este comportamiento se entiende que es por una menor eficiencia en la remoción de patógenos por parte de los humedales, aumentando así los costos de inversión inicial en los trenes cuando se incluye la desinfección por medio de laguna de maduración. Esta es una conclusión que puede ser confirmada al revisar las fórmulas de remoción de patógenos de los sistemas naturales, la cual es función del tiempo de retención que en general suele ser mayor en las lagunas.

Comparando el Gráfico 3 y el Gráfico 5 se ve que incluir la desinfección aumenta la magnitud de los costos en alrededor de 3 veces. Esto muestra que incluir la fase de desinfección con lagunas de maduración puede aumentar los costos en grandes proporciones, aunque esto se requiere cuando el efluente de la planta va a ser utilizada por ejemplo en agricultura y los beneficios pueden compensar los costos. Cabe destacar que existen otros sistemas de desinfección y es importante evaluar en qué escenarios es mejor emplear otros.

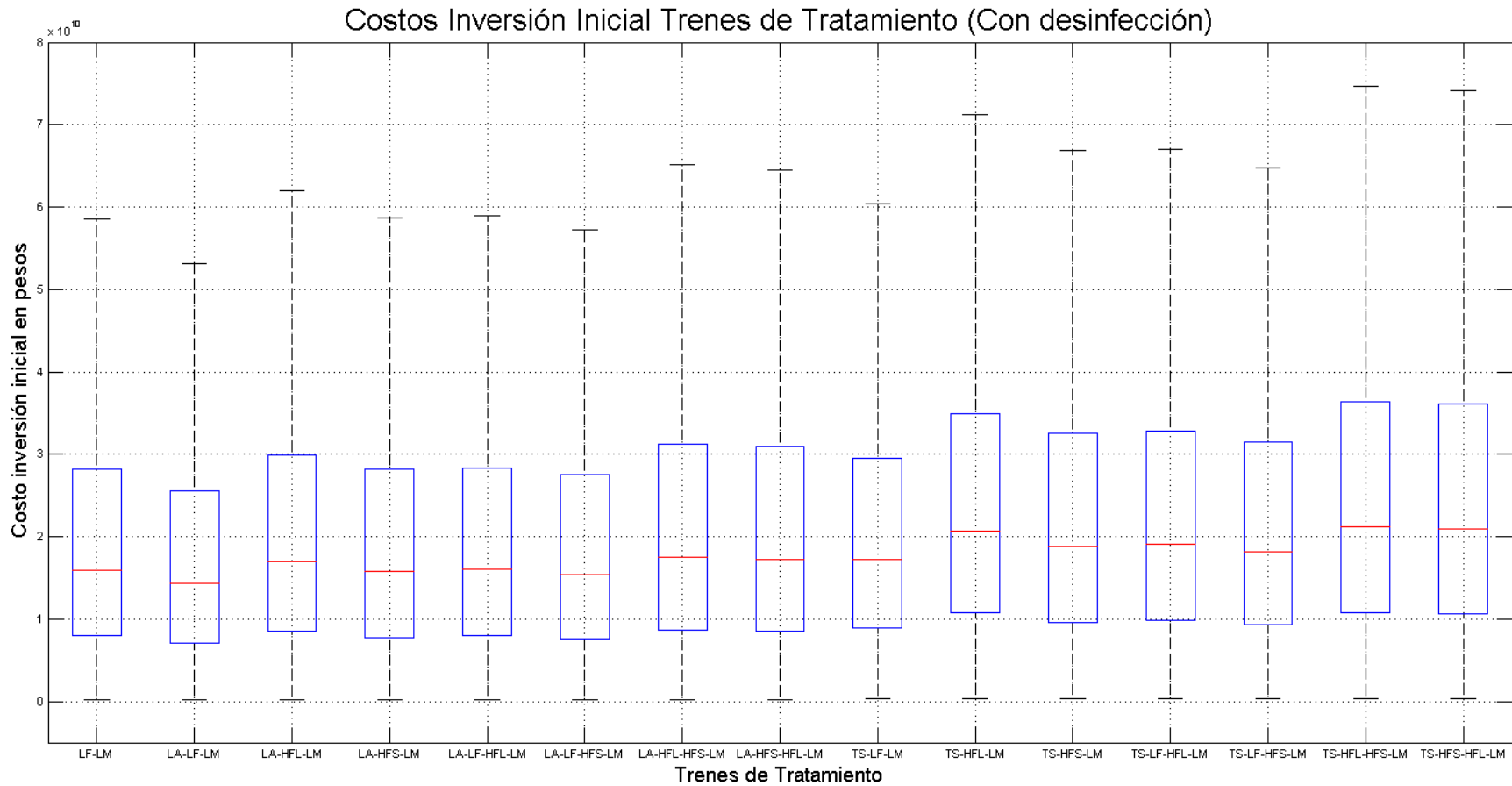


Gráfico 5. Costo inversión inicial trenes de tratamiento con desinfección

En el Gráfico 6 se presentan los costos de O&M para los diferentes trenes de tratamiento con desinfección. Estos presentan el mismo comportamiento que para los sistemas sin desinfección, donde la diferencia entre los diferentes trenes es mínima.

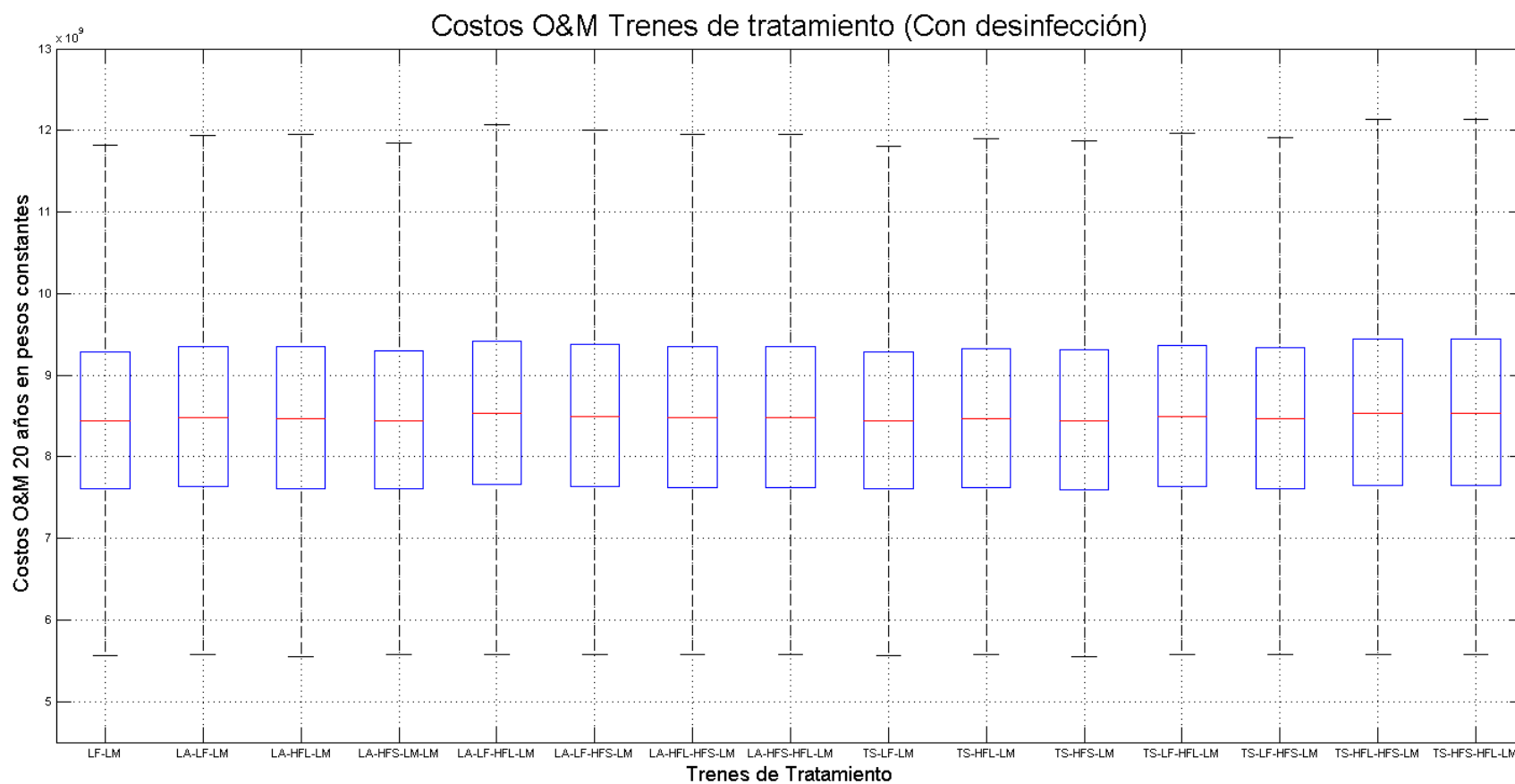


Gráfico 6. Costo O&M 20 años trenes de tratamiento con desinfección

Comparando el Gráfico 4 y el Gráfico 6 se observa que al igual que con los costos de inversión estos aumentan al incluir la desinfección, aunque en una proporción mucho menor, ya que esta diferencia es aproximadamente el 20 %.

En el Gráfico 7 se presenta la mediana de los costos de inversión inicial, O&M de los trenes de tratamiento sin desinfección en barras. Donde se pueden ver con mayor claridad la tendencia de comportamiento de los costos de inversión inicial, O&M. Como se puede ver los trenes que tienen tanque séptico en su tratamiento primario presentan costos de inversión inicial casi iguales a los costos de O&M, mientras los trenes que tienen laguna anaerobia en el tratamiento primario presentan costos mucho menores. El sistema que solo cuenta con laguna facultativa presenta costos parecidos a los de los trenes que tiene tanque séptico.

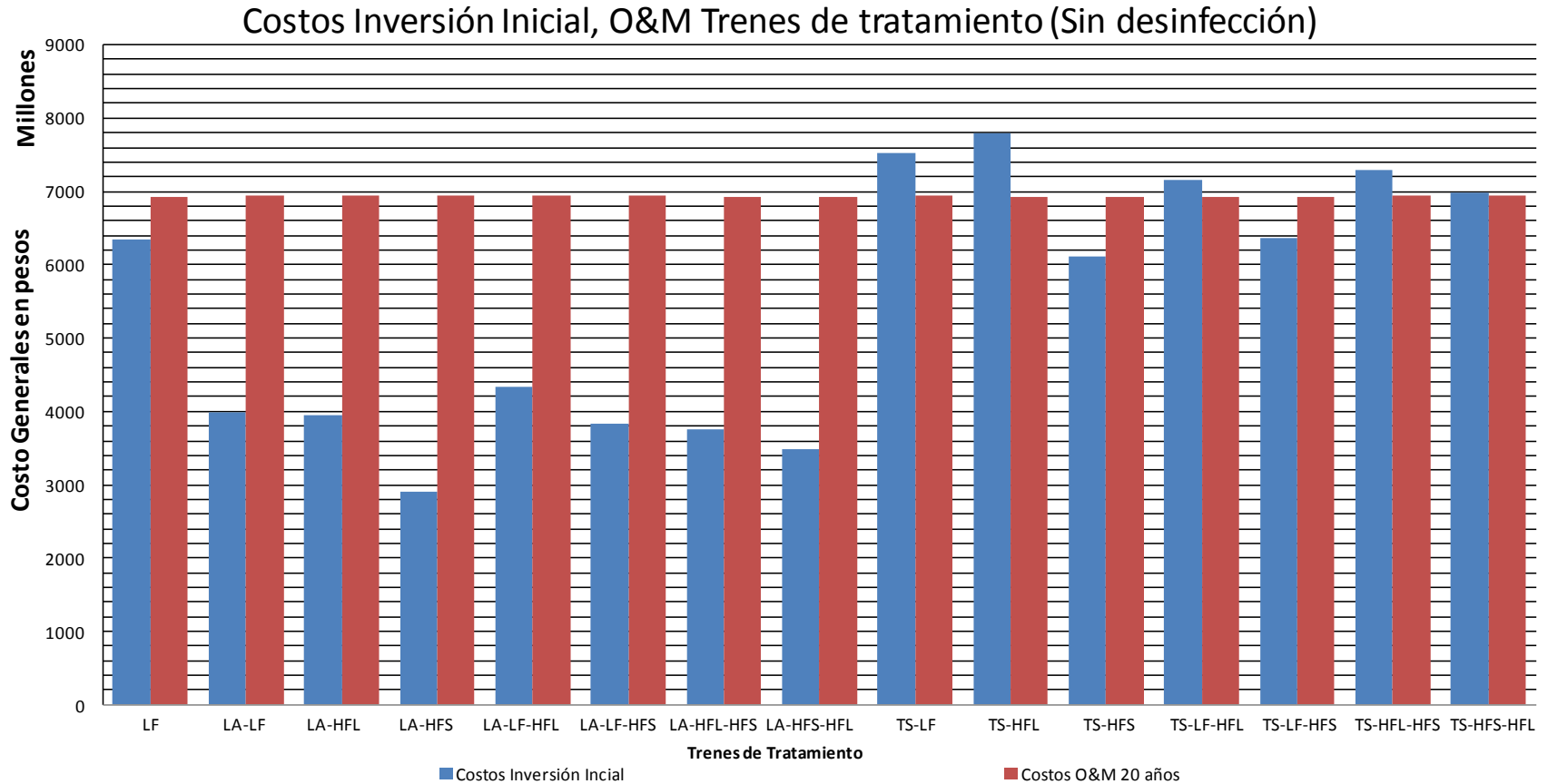


Gráfico 7. Mediana simulación Costos inversión inicial, O&M Trenes de tratamiento (Sin desinfección)

En el Gráfico 8 se presentan la mediana de los costos de inversión inicial, O&M de los trenes de tratamiento con desinfección en barras. En este podemos ver que incluir la desinfección con lagunas de maduración aumenta los costos de inversión en mayor proporción que los costos de O&M de forma considerable.

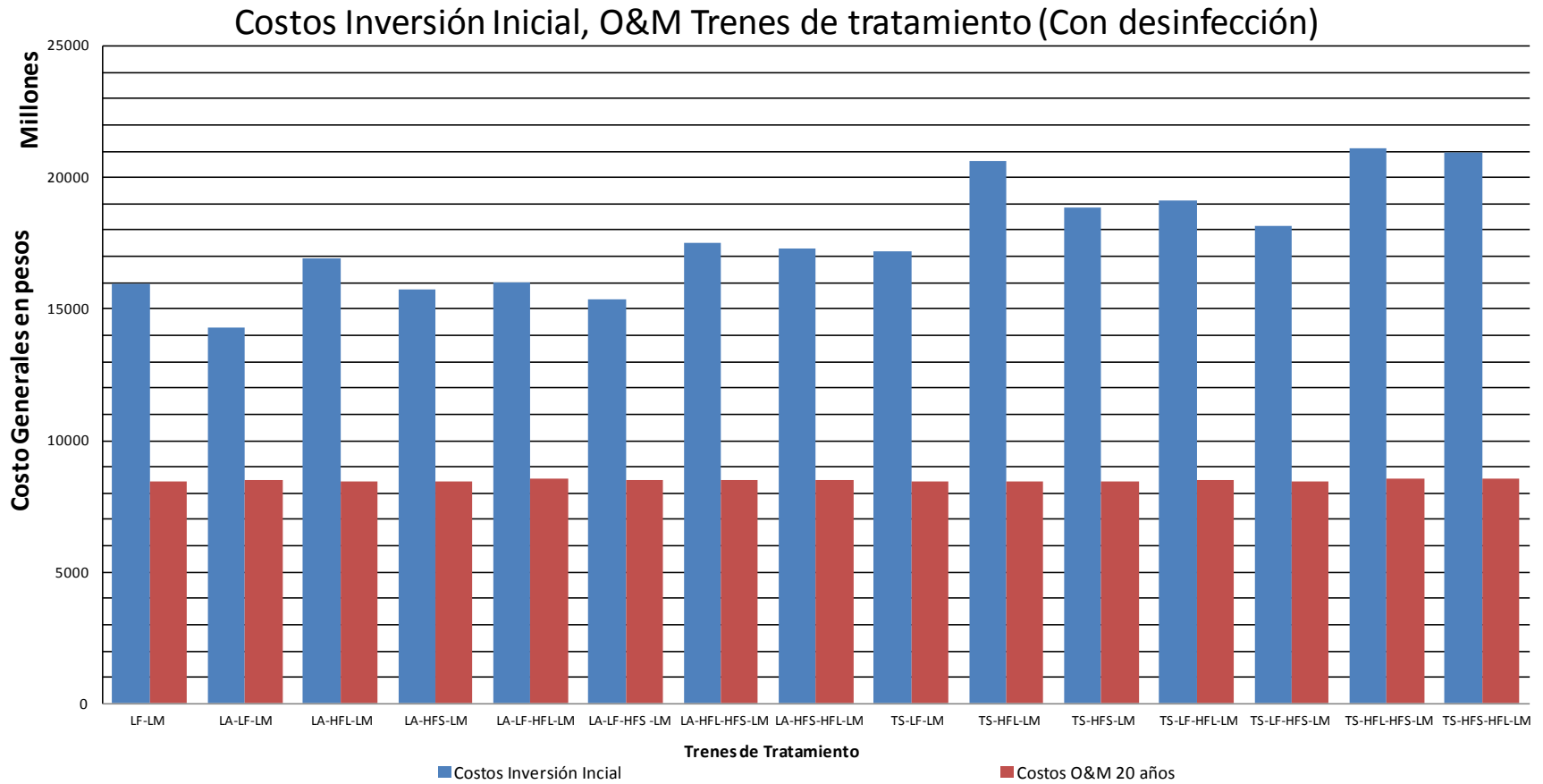


Gráfico 8. Mediana simulación Costos inversión inicial, O&M Trenes de tratamiento (Con desinfección)

6.2. Análisis Específicos

Como ya se mencionó los análisis específicos muestran la variación del conjunto de datos para las diferentes categorías de costos de inversión inicial y costos de O&M.

6.2.1. Categorías Costo Inversión Inicial

En el Gráfico 9 se presentan los costos directos de construcción de los trenes de tratamiento sin desinfección. En este podemos ver la gran diferencia entre los trenes que tienen en su tratamiento primario tanque séptico respecto a los que tiene laguna anaerobia. Confirmando lo dicho anteriormente de la importancia que tiene utilizar concreto reforzado impermeabilizado en los tanques respecto a la geomembrana en las lagunas anaerobias.

En este también se ve como el tren de laguna facultativa primaria tiene costos de construcción superiores a todos los trenes que cuentan con laguna anaerobia en su tratamiento primario, aunque cabe destacar que si tiene costos menores que los que tienen tanque séptico. Es importante resaltar que en el Gráfico 3 analizamos que este era el tren con precios más elevados junto al tanque séptico-laguna facultativa, aspecto que no se puede ver en esta categoría del costo de inversión. Esta diferencia puede explicarse viendo el Gráfico 10 donde se presentan los costos del terreno mínimo requerido para los trenes de tratamiento sin desinfección, ya que en este el tren de laguna facultativa primaria presenta los mayores costos, mostrando así que este tren presenta los costos de inversión más elevados principalmente por requerir de la mayor cantidad de terreno.

En las dos categorías de costos de inversión presentados en el Gráfico 9 y Gráfico 10 se puede confirmar que los trenes que tiene en su tratamiento primario laguna anaerobia y en el secundario solamente humedal son los más económicos, ya que en las dos categorías son los que presentan los costos más bajos. Este comportamiento se ve también en los trenes que tienen tanque séptico en el tratamiento primario y humedal en el secundario teniendo en cuenta el aumento que presentan los trenes de que tienen tanque séptico.

En el Gráfico 9 podemos ver que todos los trenes que presentan laguna anaerobia en su tratamiento primario presentan los costos de construcción más bajos y además muy similares, aunque el tren que presenta laguna anaerobia en su tratamiento primario, laguna facultativa y humedal de flujo subsuperficial en el secundario como el más eficiente y con precios más bajos de construcción. Es importante destacar que los sistemas que tienen tanque séptico en su tratamiento primario se presenta este mismo tren como el más eficiente.

En el Gráfico 10 se presentan los costos el terreno mínimo requerido de los trenes de tratamiento sin desinfección. En este se ve una tendencia muy importante a que los trenes que tienen humedal presenten requerimiento de terreno menor a las lagunas. En los sistemas que presentan laguna anaerobia en el tratamiento primario podemos ver que el de mayor requerimiento de área es el que solamente presenta laguna facultativa en el secundario, después le siguen los trenes que tienen laguna facultativa y humedal en el tratamiento secundario.

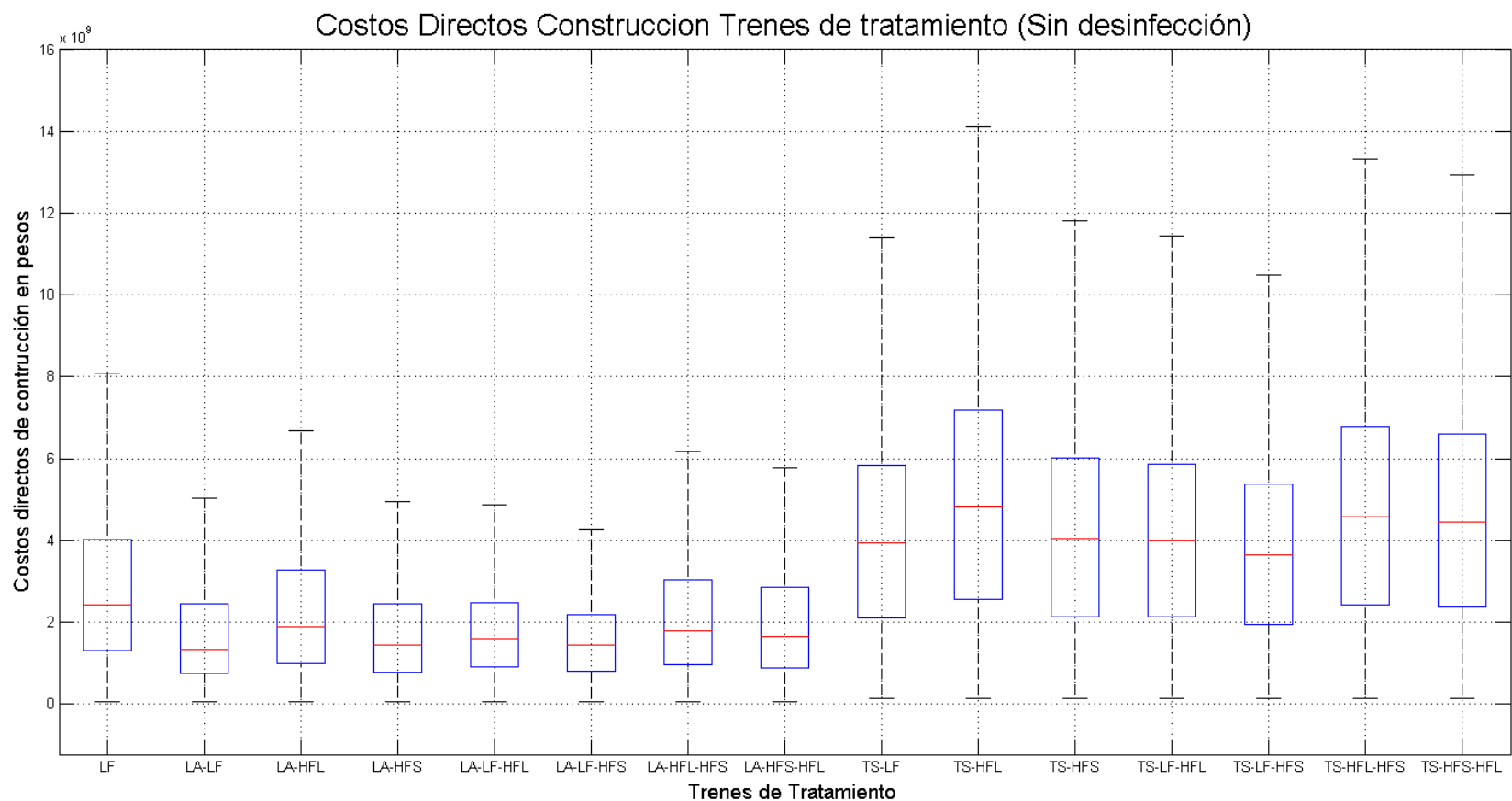


Gráfico 9. Costos directos construcción trenes de tratamiento sin desinfección

Para complementar los que solamente tienen un humedal en el secundario y los que tienen dos humedales presentan requerimientos muy parecidos, siendo el de menor requerimiento de área el que presenta humedal de flujo subsuperficial. Otro aspecto importante a resaltar es que los trenes que tienen tanque séptico en su tratamiento primario presentan los mismos comportamientos que los que tienen laguna anaerobia aunque estos requiere de un poco más de área, lo cual indica que usar tanques sépticos en serie en el tratamiento primario requiere mayor área que las lagunas anaerobias.

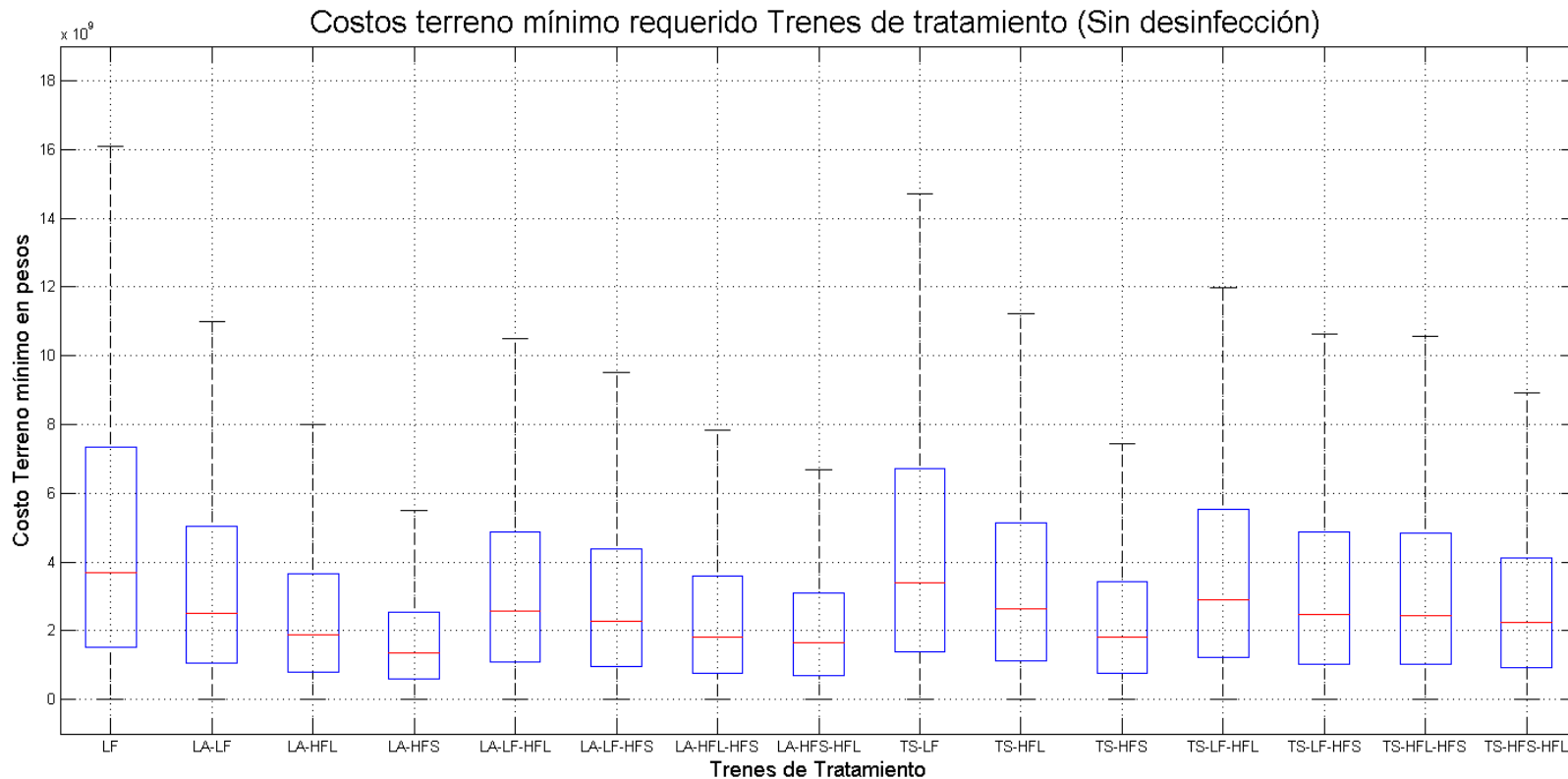


Gráfico 10. Costos terreno mínimo requerido trenes de tratamiento sin desinfección

En el Gráfico 11 se presentan los costos directos de construcción de los trenes de tratamiento con desinfección. En este vemos el mismo comportamiento que en los análisis sin desinfección, aunque la diferencia entre los trenes que en su tratamiento primario tienen laguna anaerobia frente a los que tienen tanque séptico no es tan marcada.

Comparando el Gráfico 9 y el Gráfico 11 vemos que incluir la desinfección aumenta entre 2 y 3 veces los costos directos de construcción. Los trenes que tienen humedal presentan costos directos mayores como ya se mencionó en los análisis generales de inversión inicial, así como en los costos del terreno requerido y será analizada a continuación.

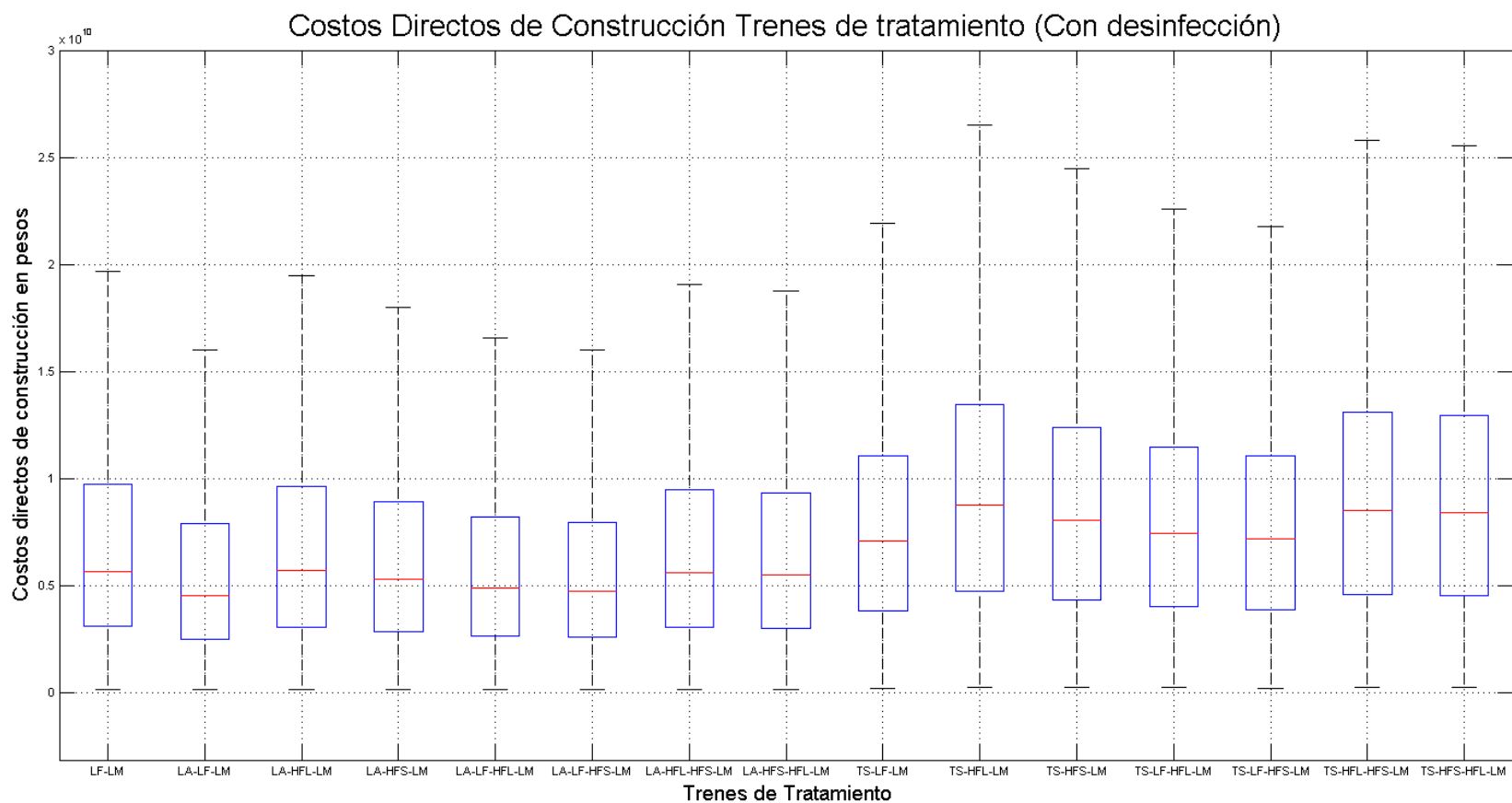


Gráfico 11. Costos directos construcción trenes de tratamiento con desinfección

En el Gráfico 12 se presentan los costos del terreno mínimo requerido para los trenes de tratamiento con desinfección. En este no se ve tan marcada la diferencia entre los trenes que en su tratamiento primario tiene laguna anaerobia respecto a los que tienen tanque séptico.

Comparando el Gráfico 10 y el Gráfico 12 se observa que incluir la desinfección aumenta notoriamente el costo del terreno requerido por los trenes de tratamiento, ya que este aumenta entre 3 y 7 veces los costos del terreno requerido. Esto permite concluir que el costo del terreno es una variable de mucha importancia en la inclusión de la desinfección por medio de lagunas de maduración.

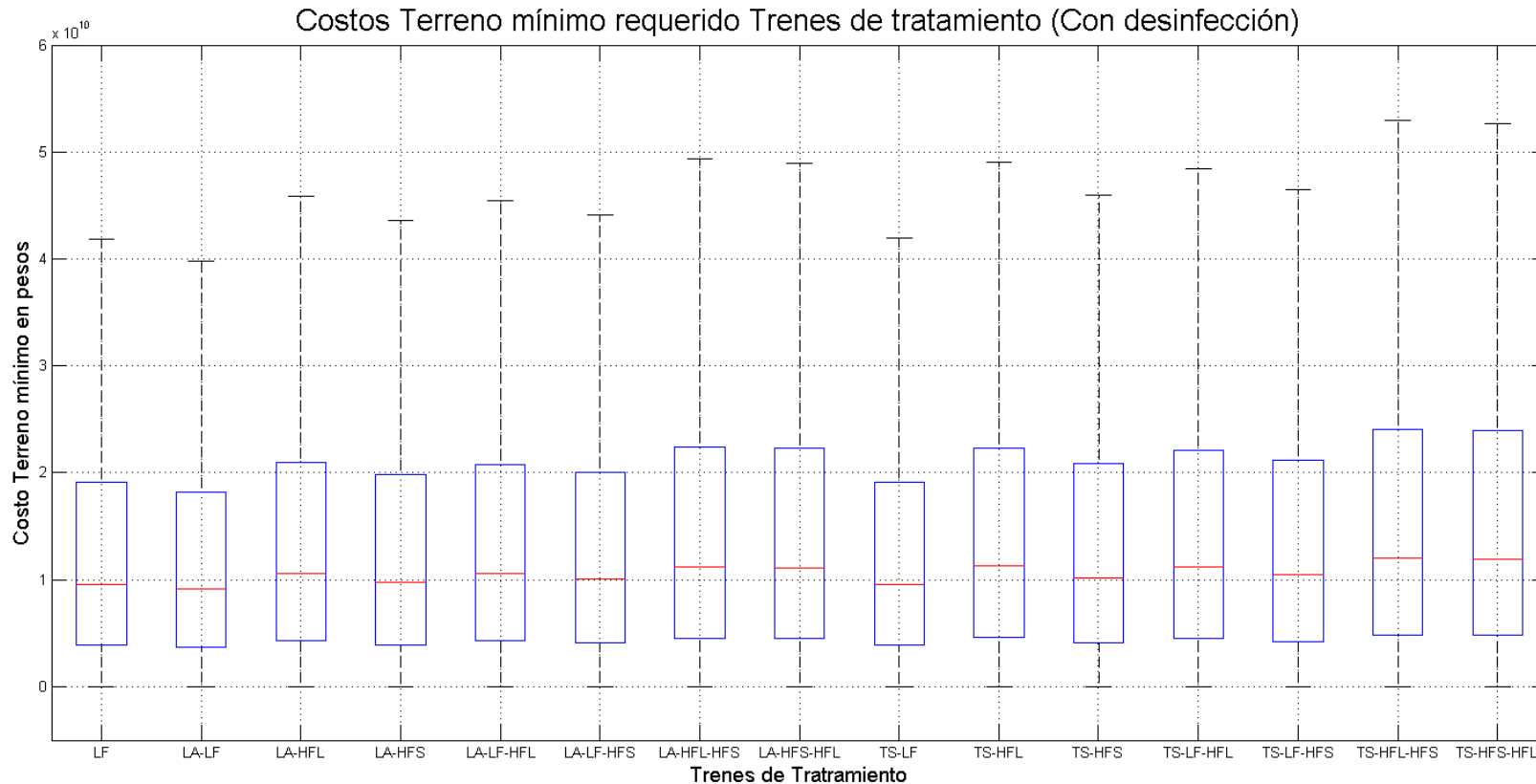


Gráfico 12. Costos terreno mínimo requerido trenes de tratamiento con desinfección

En el Gráfico 13 se presentan la mediana de los costos de las categorías de inversión inicial sin desinfección. En este podemos ver que los sistemas que cuentan con laguna anaerobia en su tratamiento primario y humedal en el secundario presenta costos directos de construcción y de terreno muy parecidos, tanto para los que tiene solamente un humedal como los que tienen dos humedales. Los sistemas con laguna facultativa en el tratamiento secundario presentan costos de terreno requerido notablemente mayores, mostrando el orden de magnitud del aumento en el tamaño de la planta en los trenes con lagunas.

Como se mencionó los sistemas que tiene tanque séptico en su tratamiento primario presentan costos mayores a los que tiene laguna anaerobia. En este podemos ver que el aumento es principalmente en los costos directos de construcción. También es

importante destacar que el tren con menores costos de inversión inicial es el tren laguna anaerobia humedal de flujo subsuperficial y entre los que tienen tanque séptico también presenta los menores costos la combinación con humedal de flujo subsuperficial.

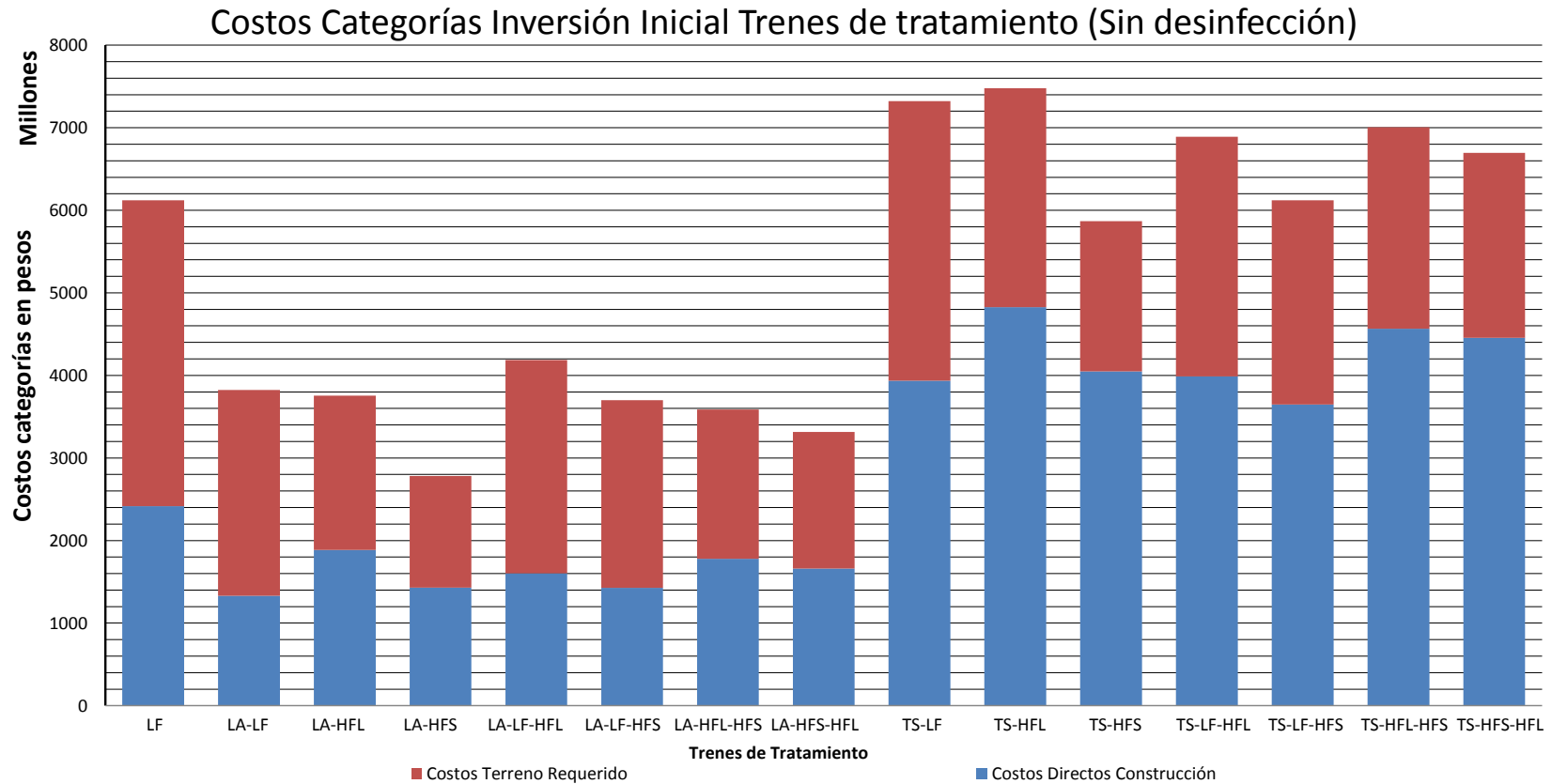


Gráfico 13. Mediana simulación categorías costos inversión inicial trenes de tratamiento (Sin desinfección)

En el Gráfico 14 se presentan la mediana de los costos de las categorías de inversión inicial con desinfección. Donde se puede ver el orden de magnitud de la importancia que toman los costos del terreno requerido cuando se incluye la desinfección, aspecto por el cual el costo del terreno se convierte en un aspecto muy importante para la toma de decisión en la inclusión del este por medio de lagunas de maduración. En general los costos de inversión inicial aumentan entre 2 y 3 veces al incluir la desinfección, presentando

el menor aumento el tren de laguna facultativa primaria, ya que este en su diseño presenta en general tiempos de retención altos lo que mejora la eficiencia en la remoción de patógenos, disminuyendo los costos de la fase de desinfección.

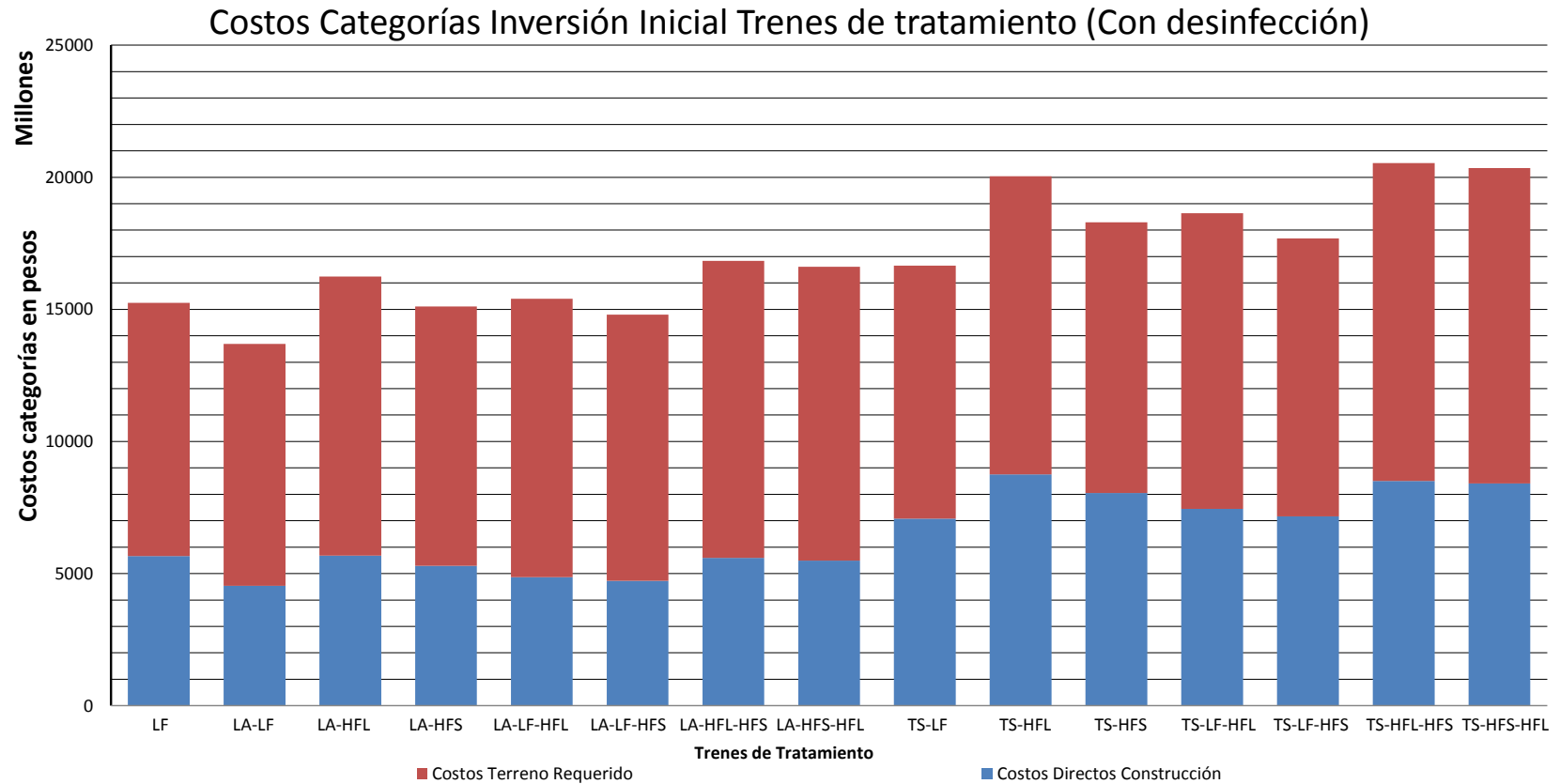


Gráfico 14. Mediana simulación categorías costos inversión inicial trenes de tratamiento (Con desinfección)

6.2.2. Categorías Costos O&M

Como se mencionó anteriormente estos costos son la suma de costos directos, otros costos directos y costo indirectos. Este total fue multiplicado por 20 para obtener el costo de la O&M a 20 años en pesos constantes, y este fue el resultado presentado en el Gráfico 4 sin desinfección y en Gráfico 6 con desinfección. El costo total por año de O&M para los trenes de tratamiento se presenta en el Gráfico 15 sin desinfección y en el Gráfico 16 con desinfección. Como ya se mencionó estos costos son muy similares para todos los trenes, lo que indica que los sistemas naturales independientemente de las combinaciones tienen costos iguales.

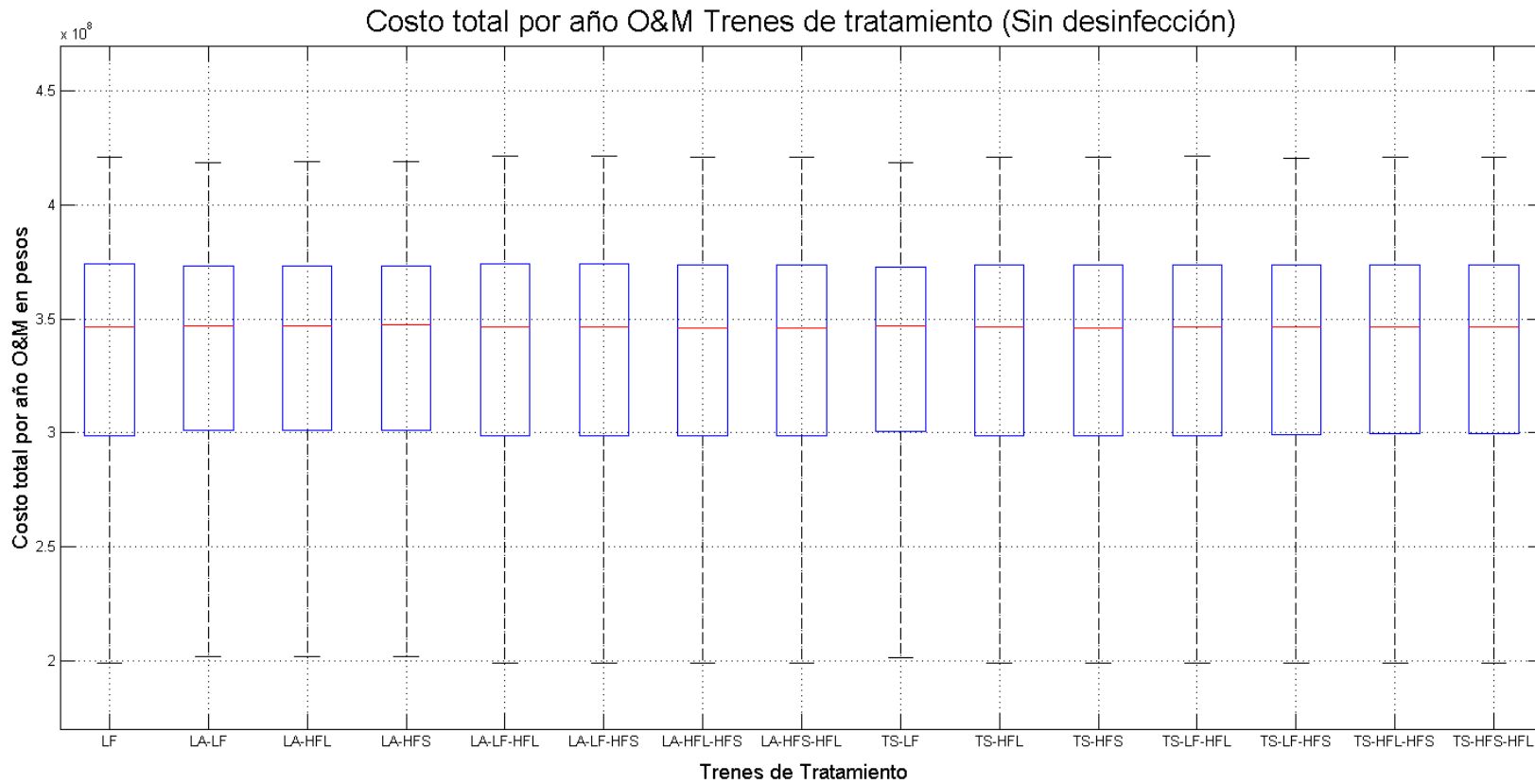


Gráfico 15. Costo total por año O&M trenes de tratamiento sin desinfección

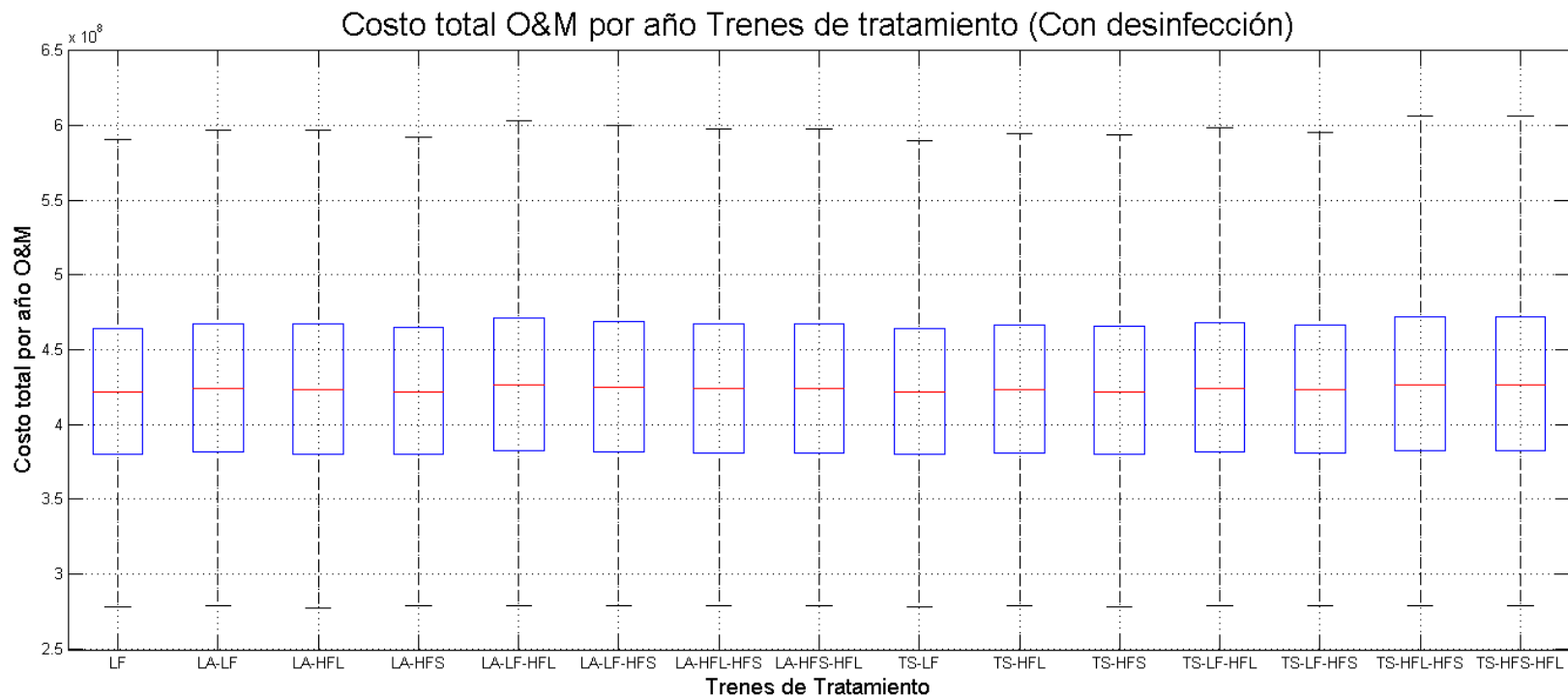


Gráfico 16. Costo total por año O&M trenes de tratamiento con desinfección

En el Gráfico 17 se presentan las categorías de los costos de O&M por año sin desinfección. Los gráficos de barras se elaboraron con la mediana del conjunto de datos. En este podemos ver que los costos directos de personal es la categoría que tiene mayor impacto en el total.

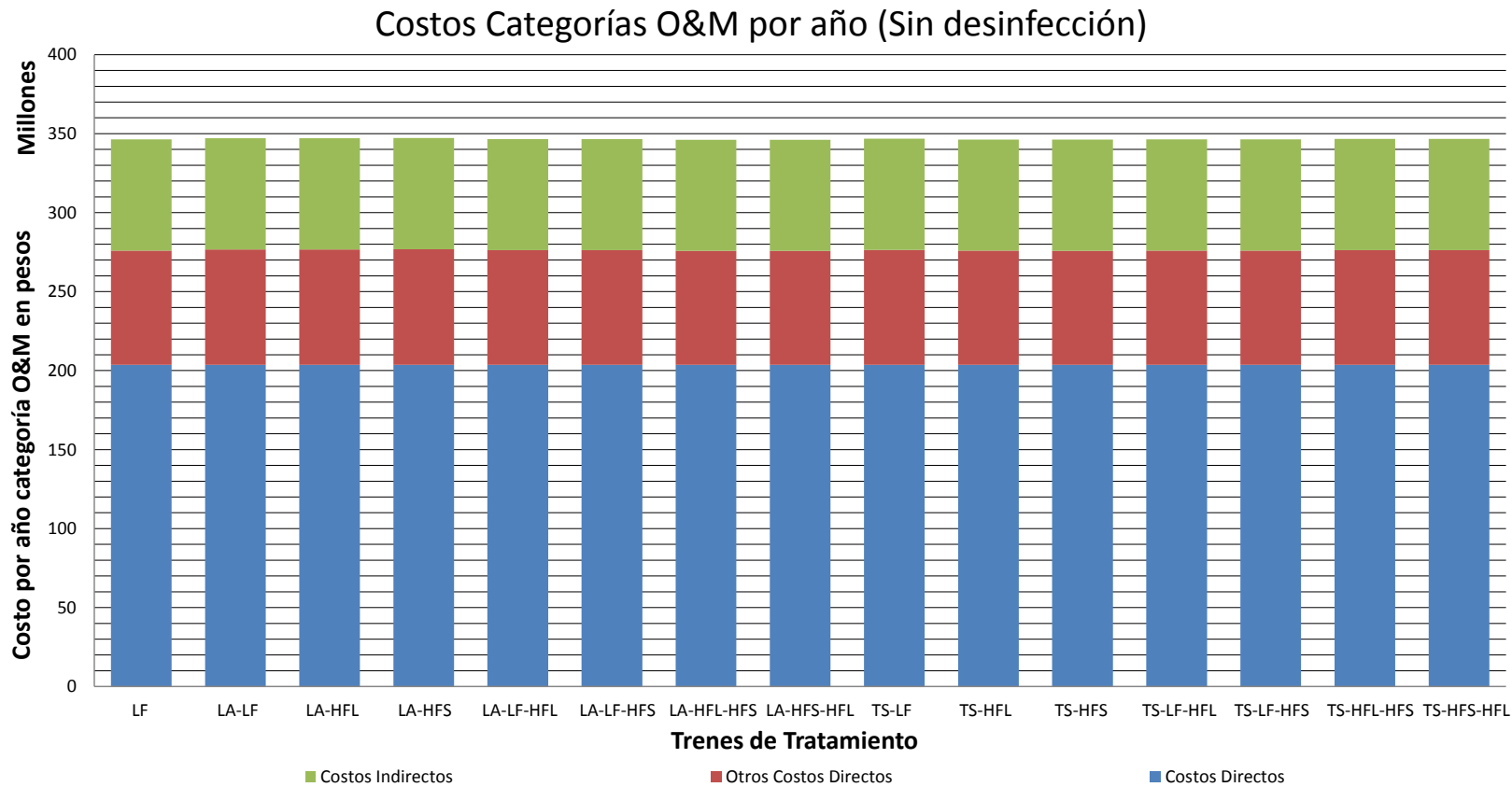


Gráfico 17. Categorías Costos O&M por año (Sin desinfección)

En el Gráfico 18 se presenta la estructura de costos de la mediana de las categorías de O&M por año. En este podemos ver que los costos directos representan el 60 %, los otros costos directos y los indirectos representan el 20 % cada una. Cabe destacar que la categoría de costos directos fuera de ser la de mayor impacto en la estructura de costos, es la que mejor financiada debe estar para asegurar el buen funcionamiento del sistema y tener control sobre los proceso que allí se llevan a cabo.

Estructura de Costos Categorías O&M por año (Sin desinfección)

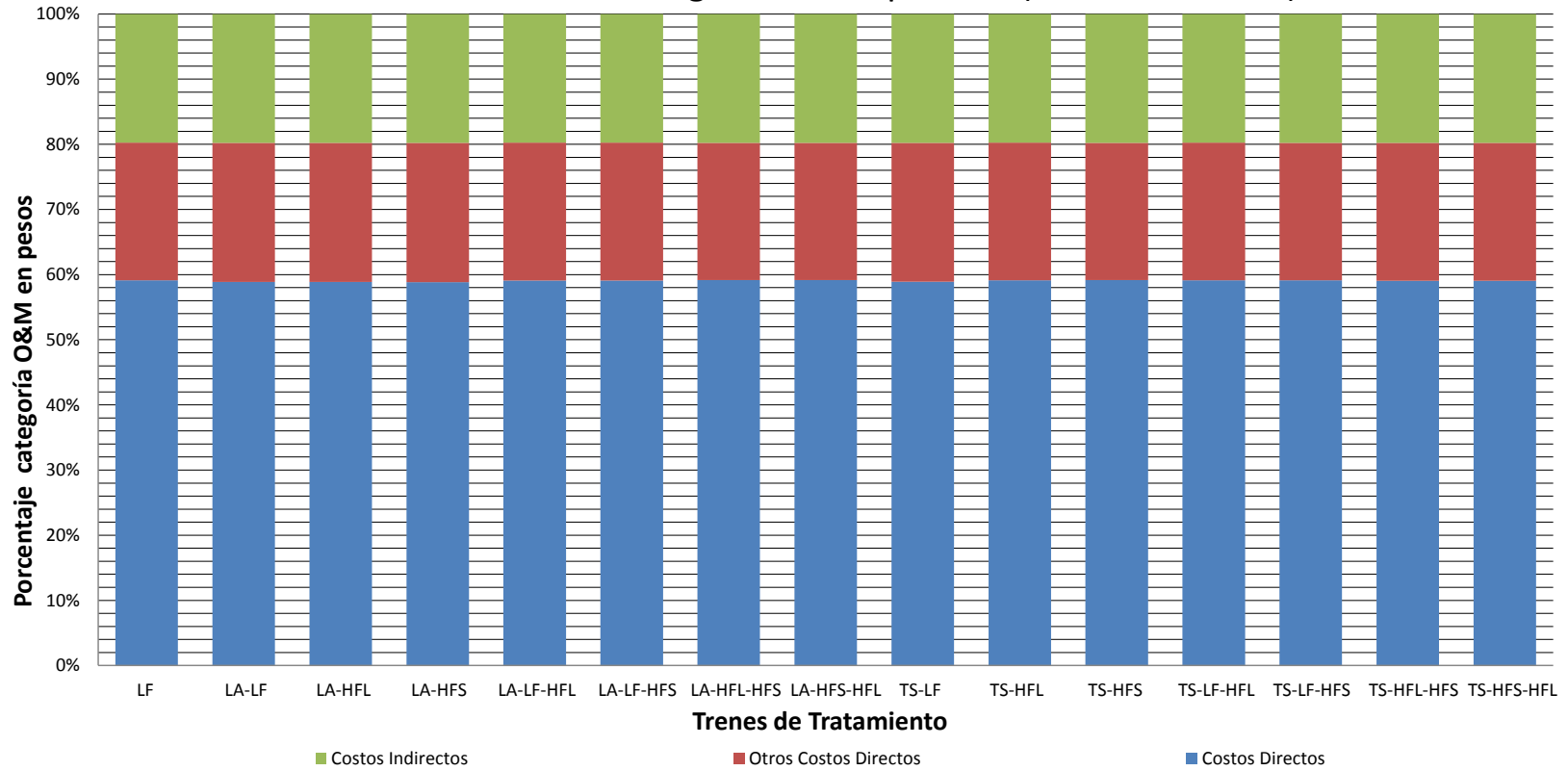


Gráfico 18. Estructura de costos categorías O&M por año (Sin desinfección)

En el Gráfico 19 se presentan las categorías de los costos de O&M por año sin desinfección. Estos presentan los mismos porcentajes de influencia en cada categoría respecto a los costos sin desinfección. Comparando el Gráfico 17 y el Gráfico 19 podemos ver que los costos tienen un aumento aproximado del 20 % cuando se incluye la desinfección.

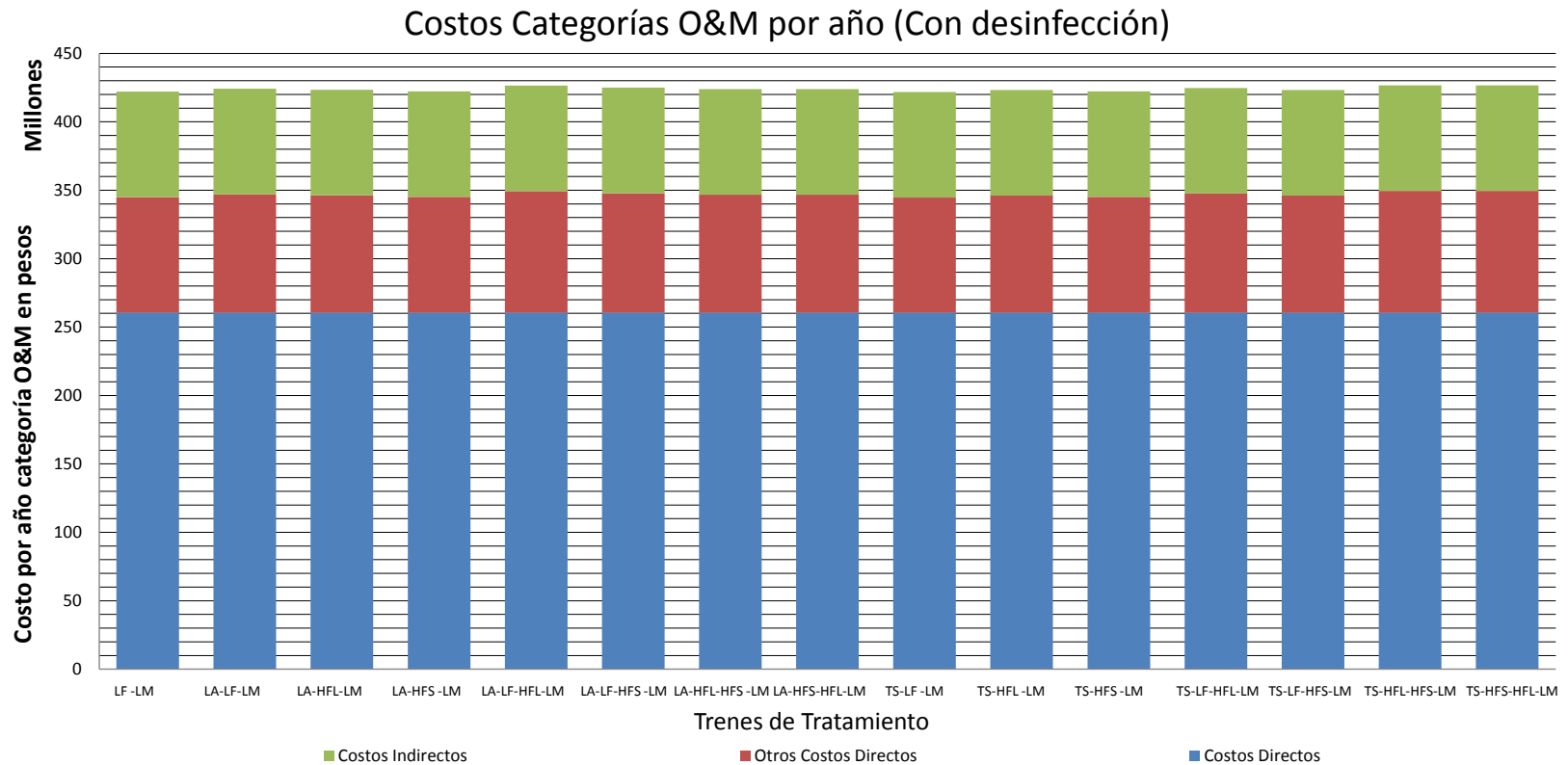


Gráfico 19. Categorías Costos O&M por año (Con desinfección)

En el Gráfico 20 se presenta la estructura de costos de la mediana de las categorías de O&M con desinfección. En estos podemos ver la importancia que sigue teniendo el costo del personal, presentando un leve aumento en el porcentaje de incidencia respecto al porcentaje sin desinfección.

Estructura de Costos Categorías O&M por año (Con desinfección)

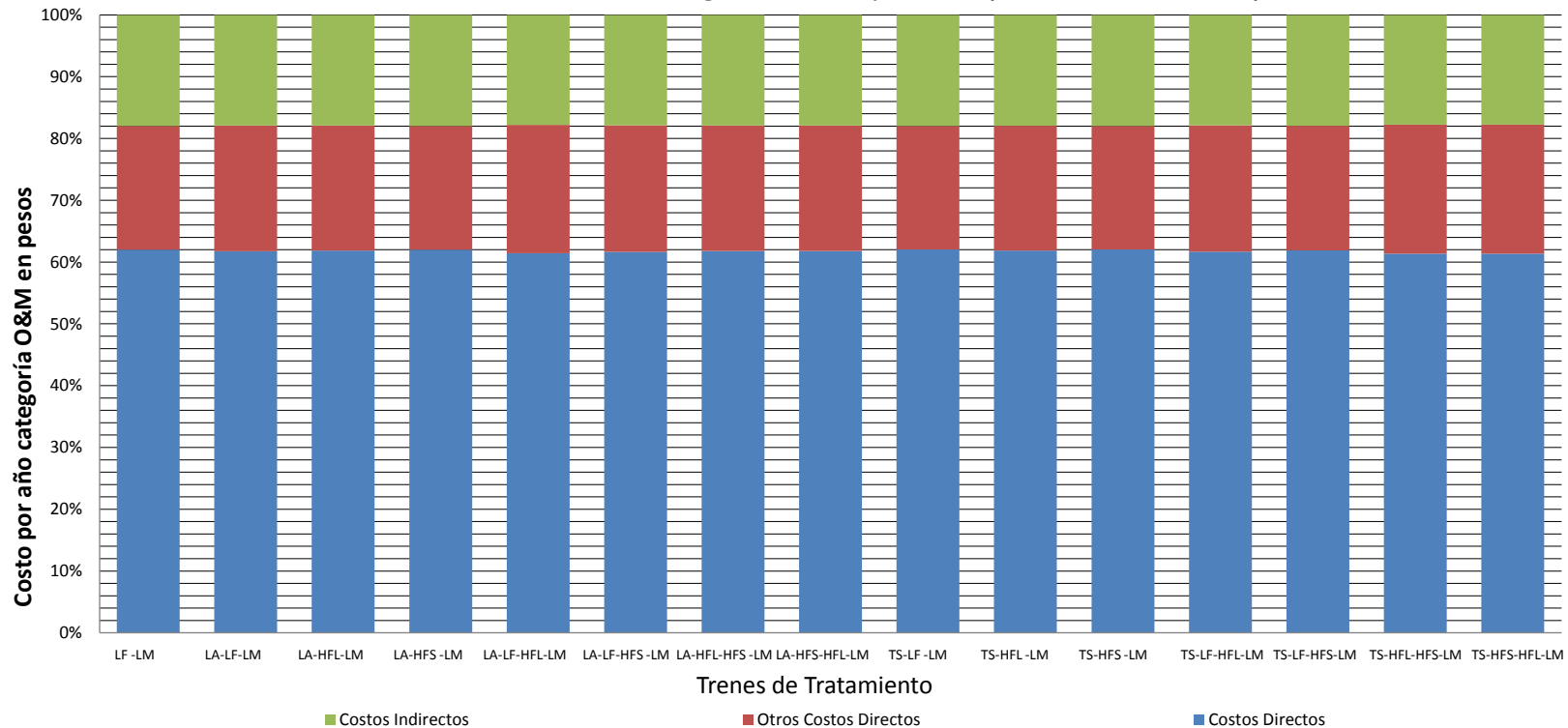


Gráfico 20. Estructura de costos categorías O&M por año (Con desinfección)

6.3. Análisis Detallados

En el Gráfico 21 se presenta la mediana de los porcentajes de la estructura de costos de los capítulos de construcción sin desinfección. En este podemos ver la importancia de las actividades de construcción en el costo total.

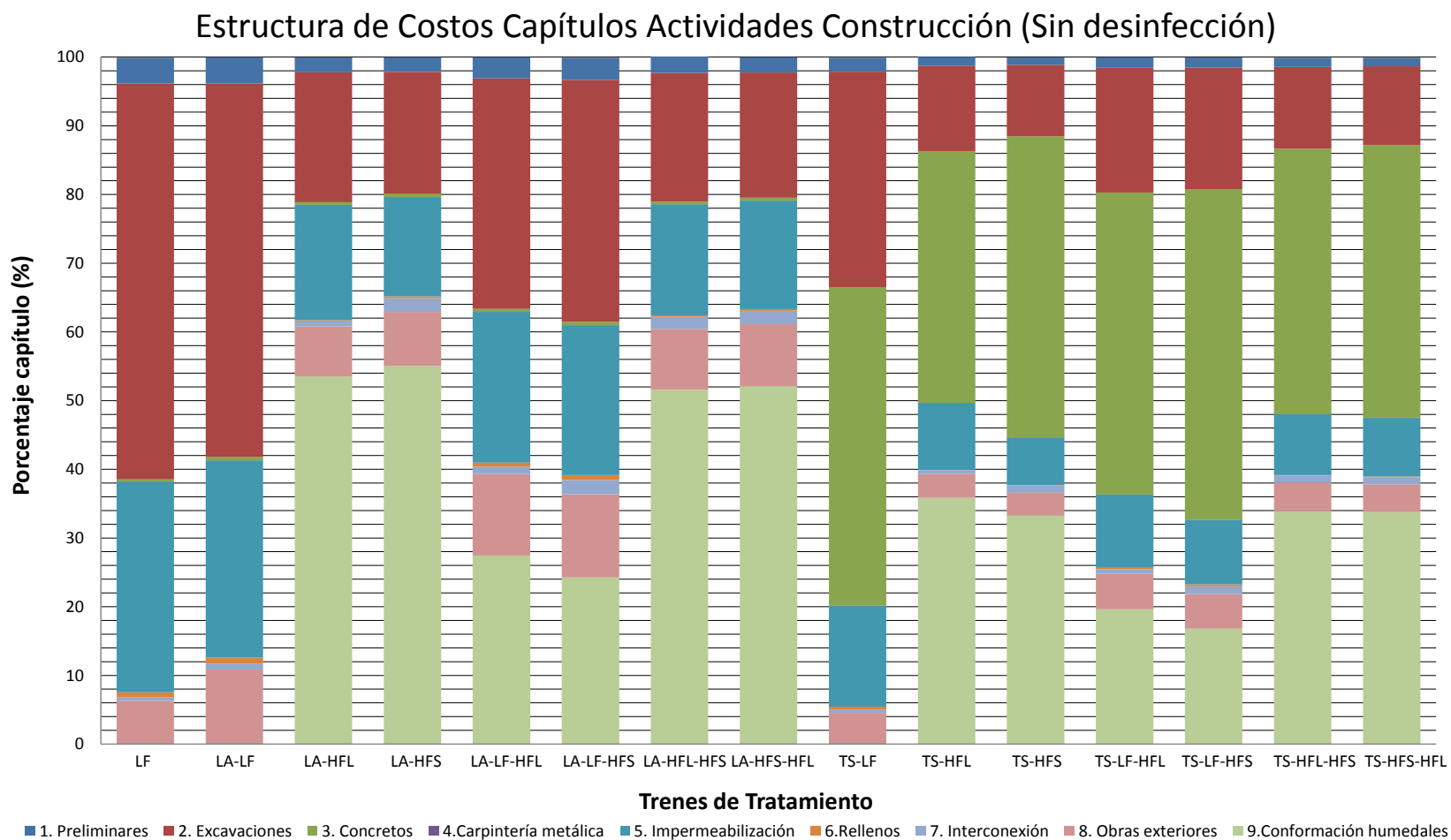


Gráfico 21. Estructura de costos capítulos actividades de construcción (Sin desinfección)

El capítulo preliminares tiene un porcentaje menor al 5 % similar para todos los trenes. Los sistemas que tienen laguna facultativa presentan un porcentaje importante en el capítulo de excavaciones, donde el descapote y las excavaciones mecánicas son las actividades de mayor relevancia. Este es el capítulo con mayor importancia en los trenes que tienen laguna.

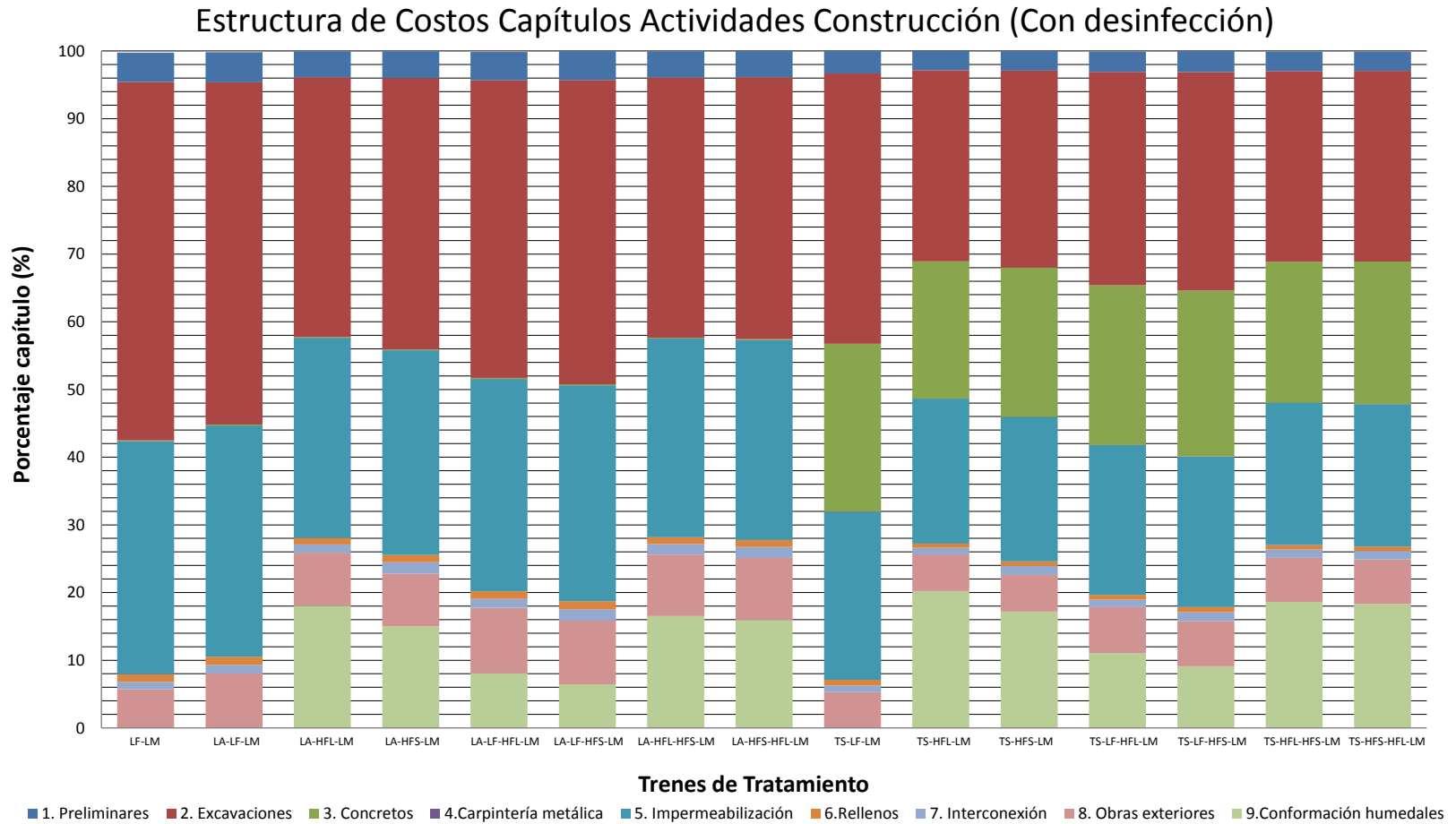


Gráfico 22. Estructura de costos capítulos costos construcción (Con desinfección)

Los sistemas que tienen tanque séptico presentan un porcentaje del capítulo concretos alto, por el concreto impermeabilizado. La impermeabilización es una actividad que debe ser tenida en cuenta entre las más importantes ya que esta se presenta en todos los trenes en un porcentaje mayor al 5 % llegando al 30 % en los trenes con laguna facultativa primaria y laguna anaerobia laguna facultativa. Esto confirma lo analizado en el Gráfico 10. Costos terreno mínimo requerido trenes de tratamiento sin desinfección, ya que las lagunas requieren de mayor área para lograr la eficiencia requerida. La conformación de humedales es un capítulo importante en los trenes que lo contienen, aunque como ya se mencionó lo en los humedales disminuye el porcentaje de excavaciones.

En el Gráfico 22 se presenta la mediana de los porcentajes de la estructura de costos de los capítulos de construcción con desinfección. En este podemos ver que el capítulo excavaciones se convierte en el de mayor influencia en todos los trenes al incluir la desinfección, así como la impermeabilización, siendo estas las dos actividades más importantes en toda la estructura de costos. El incremento en el tamaño de la planta convierte las obras exteriores en un capítulo con un porcentaje importante, mientras

En el Gráfico 23 se presenta una comparación del costo total de inversión inicial, O&M de los trenes de tratamientos sin desinfección. Esta se elaboró con valores medios en las variables de entrada (Temperatura = 16 °C, DBO = 255 mg/l, carga orgánica per cápita = 46 g/hab.d) y además se graficó en el eje y el factor resultante de dividir el costos total de cada tren sobre el costos total del tren laguna anaerobia, laguna facultativa humedal de flujo subsuperficial, el cual es el que presenta los menores costos hasta los 10,000 habitantes. En este podemos ver que los trenes después de los 10,000 habitantes presentan unas diferencias constantes, mientras entre los 500 y 10,000 algunas curvas se cruzan. Después de los 10,000 habitantes el tren laguna anaerobia, laguna facultativa se presenta como el de menores costos.

Para analizar el comportamiento donde las curvas se cruzan se elaboró el Gráfico 24, donde se presenta en detalle el comportamiento entre los 500 y los 5,000 habitantes. En este podemos ver la diferencia mencionada en análisis anteriores entre los trenes con tanque séptico respecto a los trenes con laguna anaerobia. El tren que presentan los menores costos para este rango de poblaciones el tren laguna anaerobia, laguna facultativa, humedal de flujo subsuperficial. Los trenes laguna anaerobia-laguna facultativa y laguna anaerobia-humedal de flujo subsuperficial presentan un factor comparativo elevado en población de 500 – 800, mientras en los 5,000 habitantes ya son el segundo y el tercer tren con factor comparativo más bajo.

Entre los trenes con tanque séptico el que presenta los menores costos para todas las poblaciones es el que en el tratamiento secundario presenta laguna facultativa humedal de flujo subsuperficial. El tren laguna anaerobia-humedal de flujo subsuperficial se presentaba como el tren que presentaba los menores costos cuando analizamos el conjunto de datos, pero se encontró que este comportamiento general no se cumple para el escenario planteado para estas gráficas.

Comparación Costo Total inversión inicial, O&M Trenes de Tratamiento (Sin deisfección)

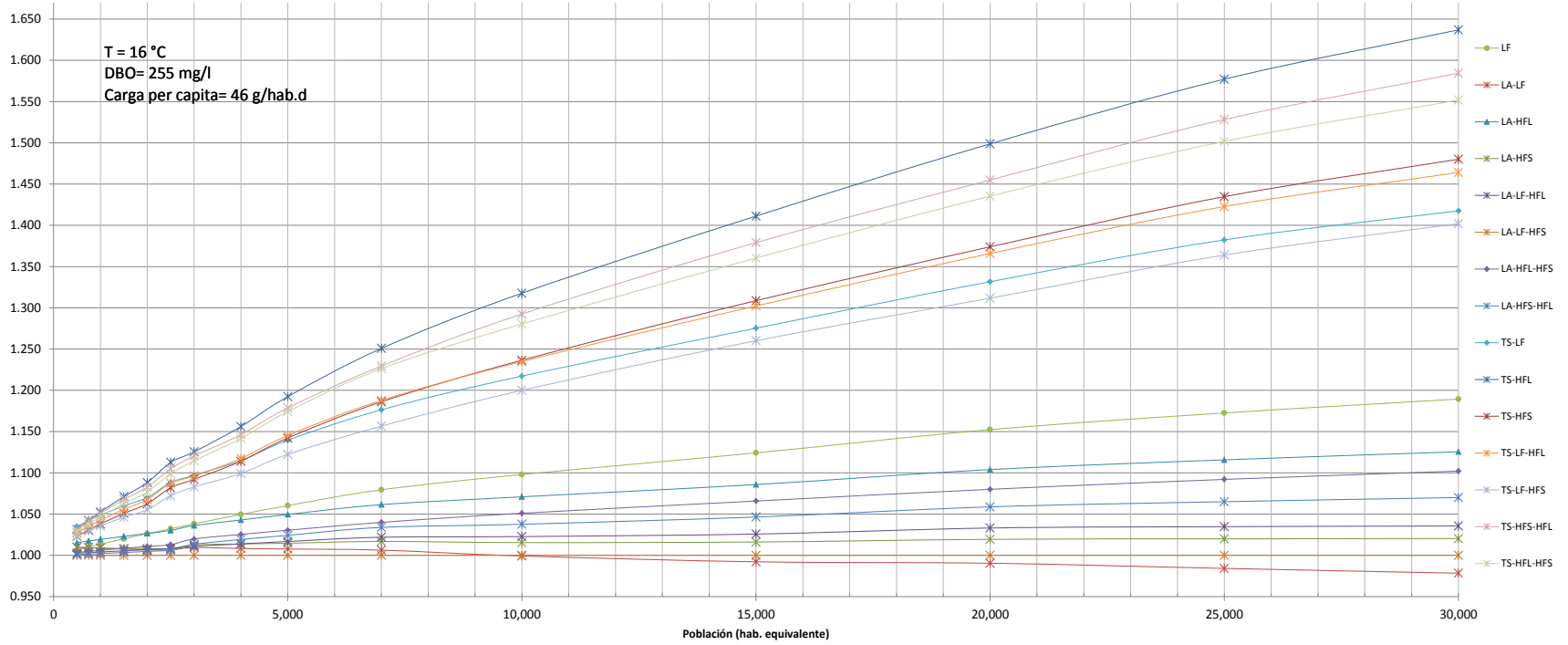


Gráfico 23. Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores medios variables de entrada

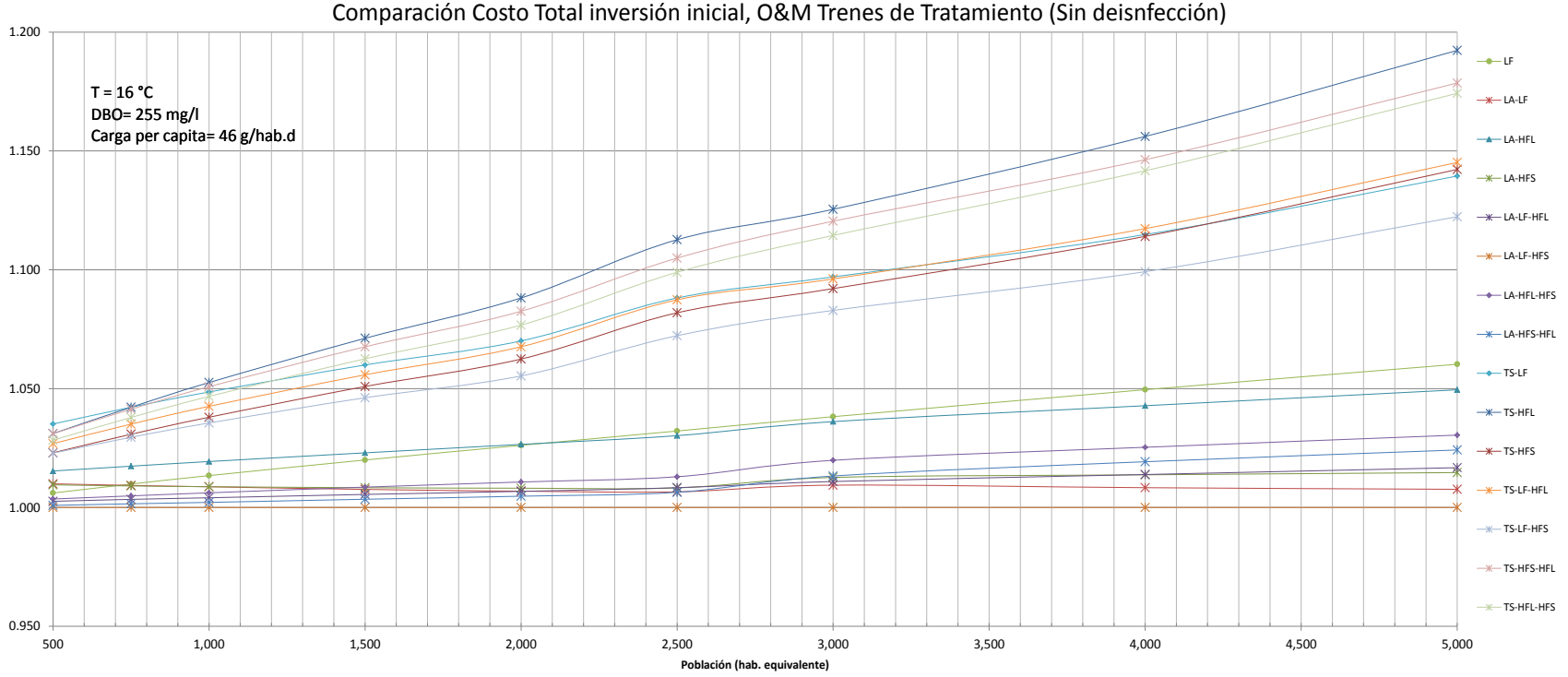


Gráfico 24. Detalle Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores medios variables de entrada

En el Gráfico 25 se presenta la comparación del costos total de inversión inicial, O&M de los trenes de tratamiento con desinfección. En este podemos ver que el tren que presenta los menores costos es el tren laguna anaerobia laguna facultativa, aspecto que se hizo notar en la comparación sin desinfección después de los 10,000 habitantes. También se puede analizar que las diferencias entre los trenes son menos marcadas, ya que el mayor factor comparativo en el Gráfico 23 llega a un máximo de 1.65 mientras en el Gráfico 25 a 1.45.

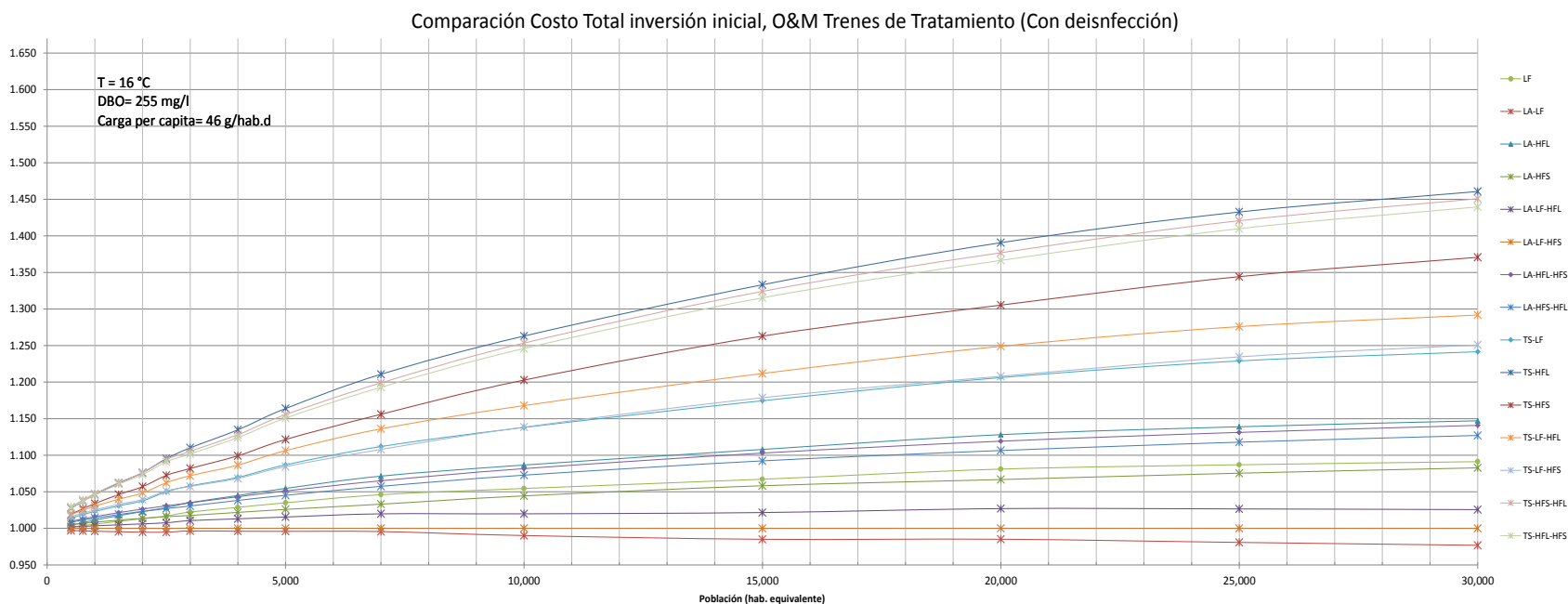


Gráfico 25. Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (con desinfección), con valores medios variables de entrada

En el Gráfico 26 se presenta el detalle de la comparación de costos de inversión inicial, O&M entre trenes de tratamiento con desinfección para poblaciones de 500 a 5,000. En este podemos ver que al incluir la desinfección el grafico presenta cruces minimos entre los trenes, lo que indica que la diferencia entre estos permanece casi igual para las diferentes poblaciones, con la diferencia ya mencionada que el tren que presenta los costos más bajos es laguna anaerobia, laguna facultativa.

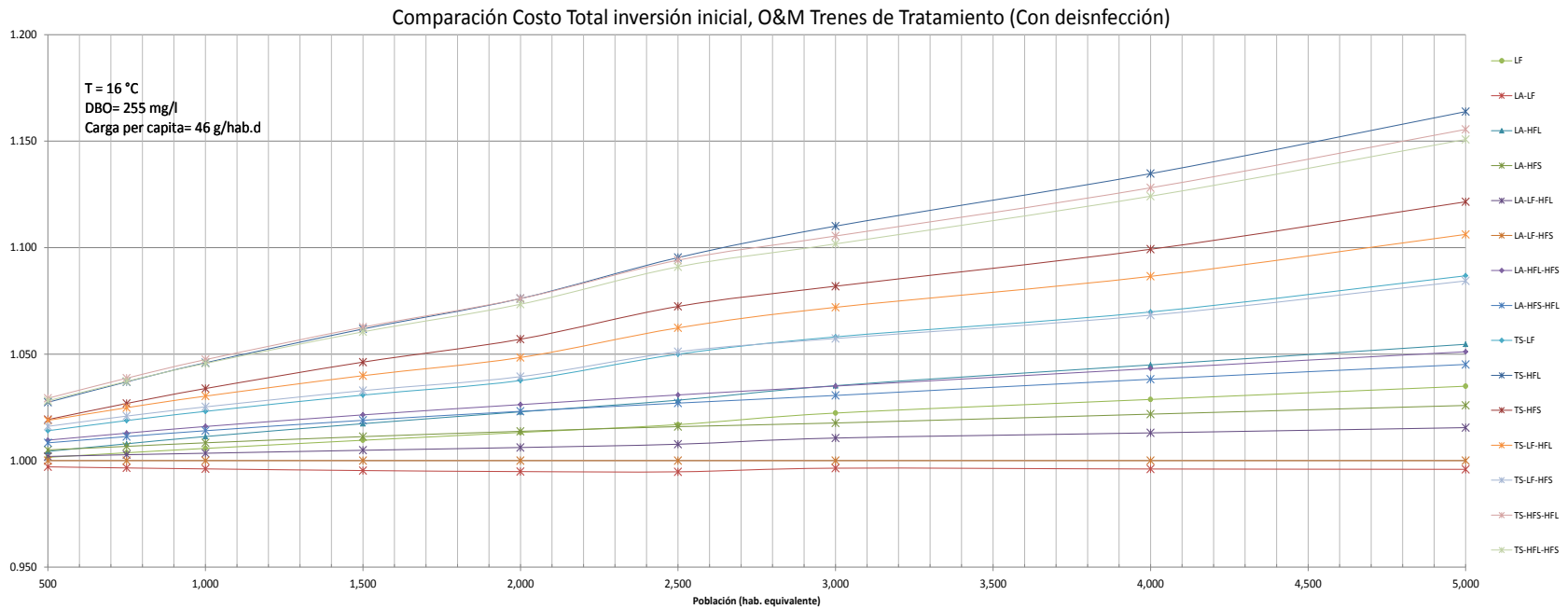


Gráfico 26. Detalle Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (con desinfección), con valores medios variables de entrada

En el Gráfico 27 se presenta una comparación del costo total de inversión inicial, O&M de los trenes de tratamientos sin desinfección. Esta se elaboró con valores altos en las variables de entrada (Temperatura = 25 °C, DBO = 400 mg/l, carga orgánica per cápita = 39 g/hab.d) y además se graficó en el eje y el factor resultante de dividir el costos total de cada tren sobre el costos total del tren laguna anaerobia, humedal de flujo subsuperficial, humedal de flujo libre el cual es el que presenta los menores costos hasta los 7,000 habitantes, de ahí en adelante se presenta el tren laguna anaerobia humedal de flujo subsuperficial como el de menores costos. Este es un aspecto que había sido analizado en los análisis generales y específicos de las categorías, donde este se presentaba como el tren con los menores costos. En este podemos ver la diferencia entre los trenes que en su tratamiento primario tienen laguna anaerobia respecto a los que tienen tanque séptico, aunque se ve más marcada, ya que la temperatura es una variable de mucha importancia en el modelo general de diseño de la laguna anaerobia a diferencia del de tanque séptico. El tren que tiene laguna facultativa primaria presenta unos costos que se encuentran en la mitad entre los trenes que tiene laguna anaerobia y los que tienen tanque séptico en el tratamiento primario, aunque para poblaciones menores a 2,000 habitantes presenta costos parecidos a los trenes con laguna anaerobia en el tratamiento primario. Este grafico muestra que para las temperaturas altas y un

agua con carga orgánica concentrada, la diferencia entre los trenes que tienen laguna anaerobia presentan costos muy similares, además presenta un factor comparativo menor a los análisis del Gráfico 23.

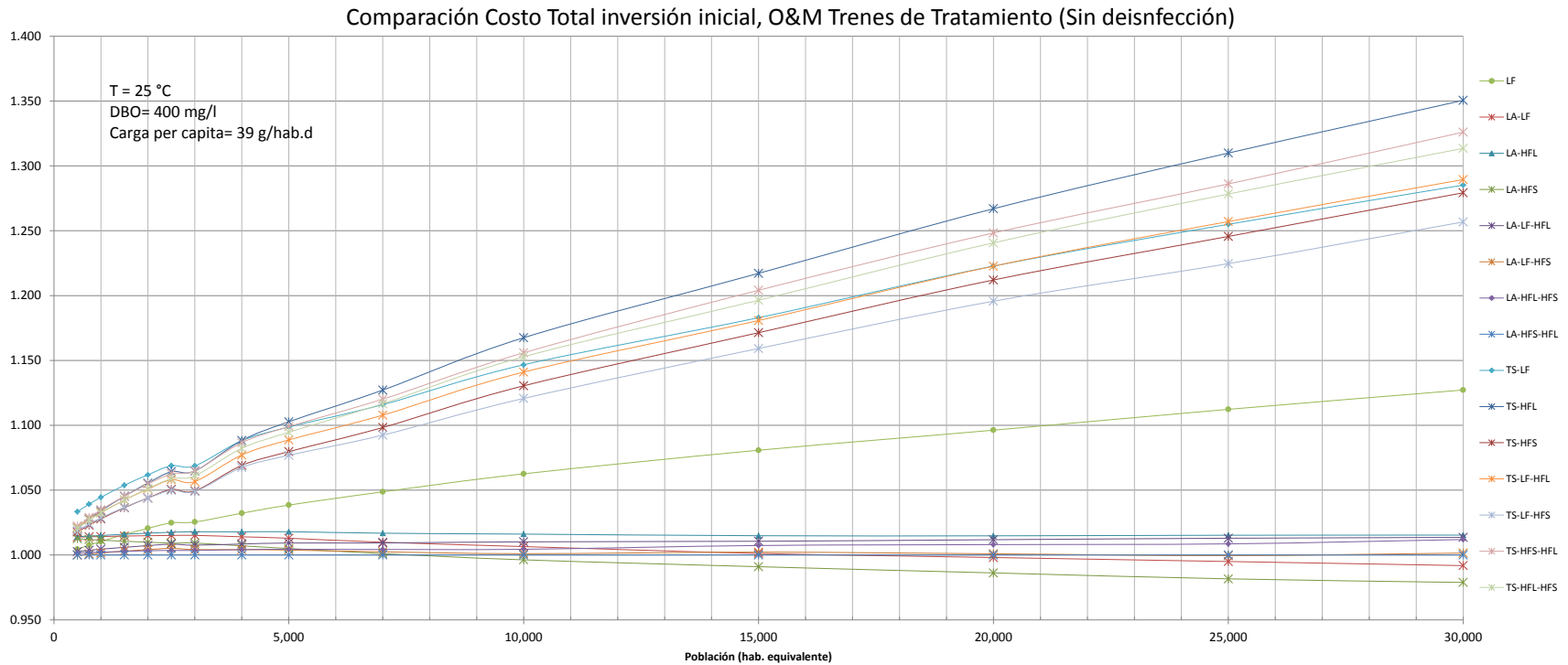


Gráfico 27. Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores altos variables de entrada

En el Gráfico 28 se presenta el detalle de la comparación de costos de inversión inicial, O&M entre trenes de tratamiento sin desinfección para poblaciones de 500 a 5,000 en el escenario planteado en el Gráfico 27. En este podemos ver con más claridad el comportamiento del tren laguna facultativa primaria en poblaciones entre 500 – 1,000 habitantes, donde empieza siendo el quinto tren con el menor factor comparativo pero después de los 1,500 ya ha cruzado todos los trenes con laguna anaerobia en el tratamiento primario y presenta una factor comparativo mayor que estos en todo el resto del rango de población.

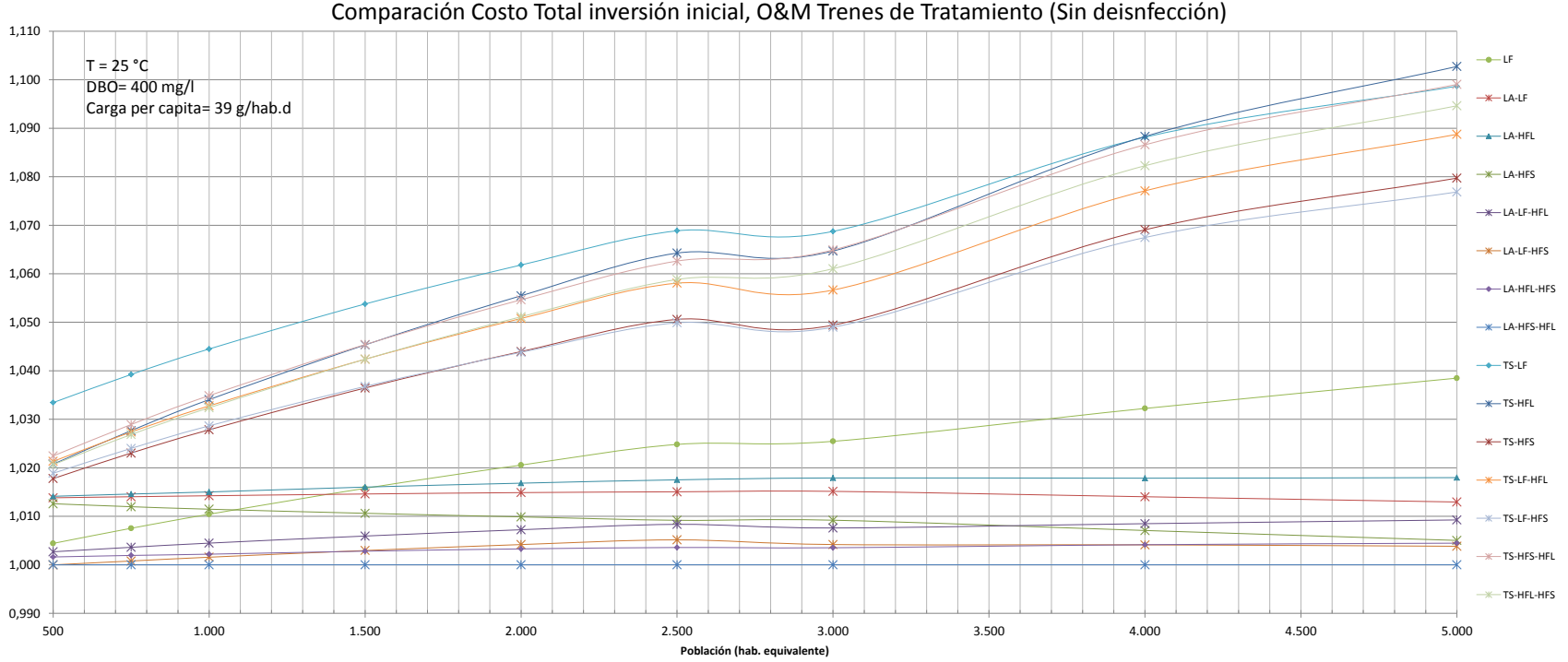


Gráfico 28. Detalle Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores altos variables de entrada

En el Gráfico 29 se presenta una comparación del costo total de inversión inicial, O&M de los trenes de tratamientos sin desinfección. Esta se elaboró con valores bajos en las variables de entrada (Temperatura = 7 °C, DBO = 110 mg/l, carga orgánica per cápita = 54 g/hab.d) y además se graficó en el eje y el factor resultante de dividir el costos total de cada tren sobre el costos total del tren laguna anaerobia, laguna facultativa, humedal de flujo subsuperficial el cual es el que presenta los menores costos hasta los 2,500 habitantes, después el tren laguna anaerobia laguna facultativa presenta los costos más bajos. Como se puede ver en este no es tan marcada la diferencia entre los trenes que en su tratamiento tiene laguna anaerobia, respecto a los que tienen tanque séptico. También se ve un aumento importante en el factor de comparación, ya que en este escenario los trenes se ven muy afectados por la baja temperatura y la carga orgánica muy diluida lo que convierte los sistemas en muy extensos y con costos muy elevados.

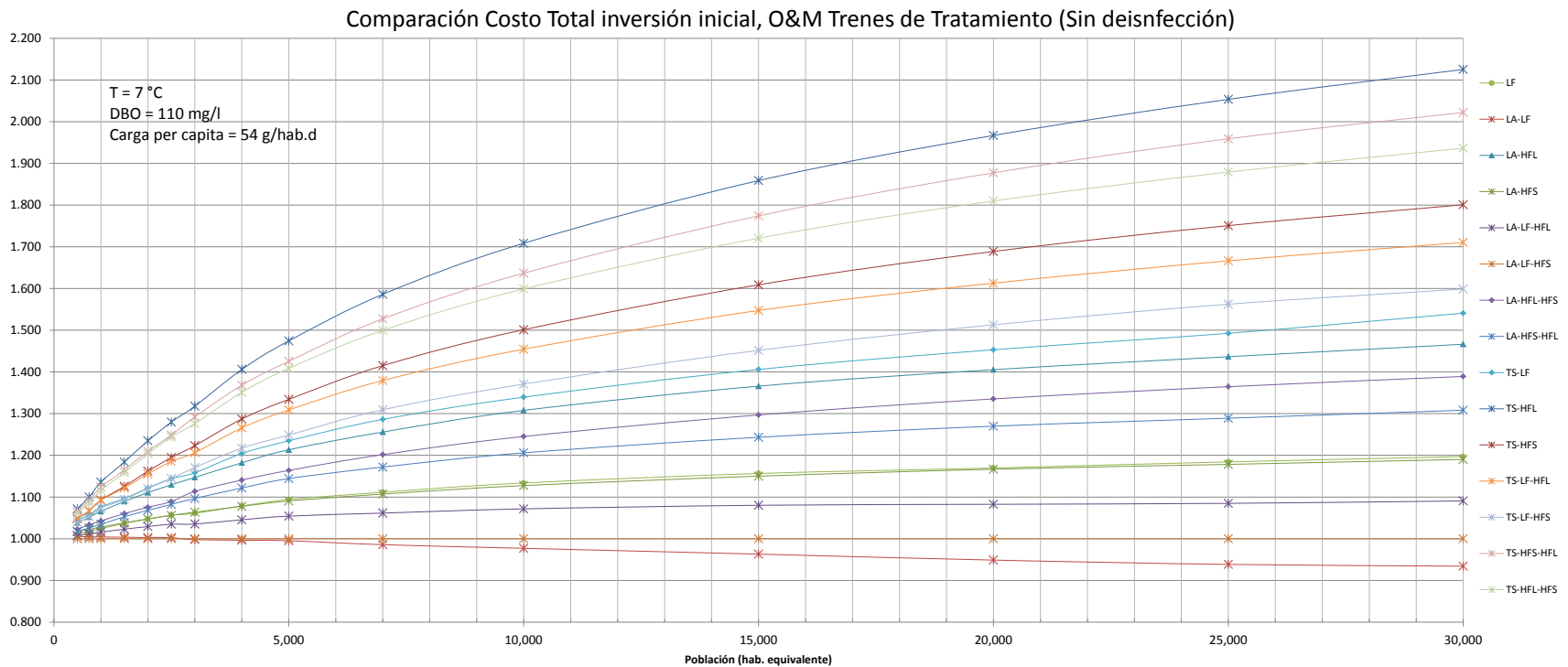


Gráfico 29. Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores bajos variables de entrada

En el Gráfico 30 se presenta el detalle entre los 500 – 5,000 habitantes del Gráfico 29. En este podemos ver que los el tren laguna anaerobia humedal de flujo libre presenta costos mayores a algunos trenes con tanque séptico en población entre 500 – 750 y además como se mencionó anteriormente no se ve de forma tan clara la diferencia entre los trenes con laguna anaerobia respecto a los que tienen tanque séptico, contando con el aumento en el factor comparativo en este escenario. El tren laguna anaerobia humedal de flujo subsuperficial presenta costos muy parecidos a la laguna facultativa primaria en este rango de población.

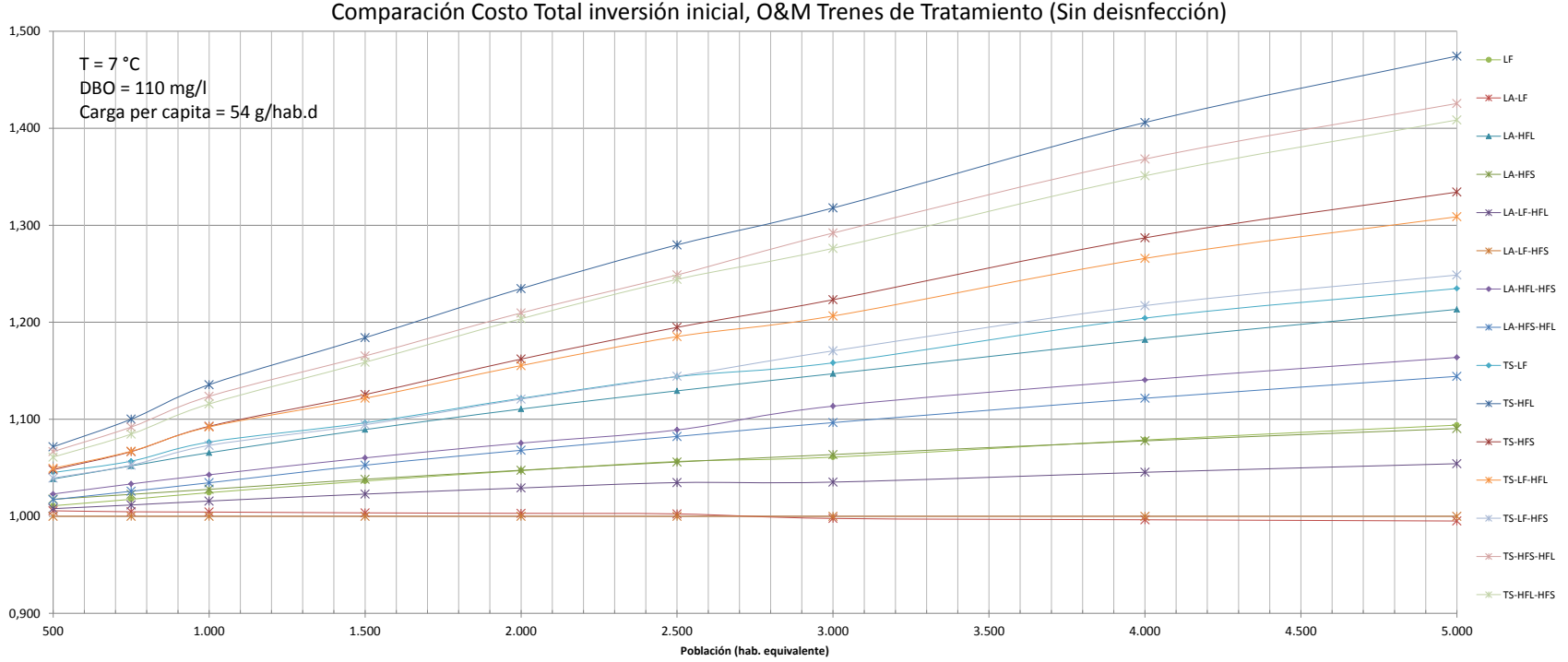


Gráfico 30. Detalle Comparación costo total inversión inicial, O&M trenes de tratamiento (sin desinfección), con valores bajos variables de entrada

6.4. Herramienta de soporte para la toma de decisiones

Se desarrolló una herramienta en php, donde el usuario puede ingresar las variables de entrada como población, temperatura media del mes más frío, evaporación neta, sólidos suspendidos, DBO, carga orgánica per cápita, huevos de helminto, coliformes fecales, esta primera pantalla se muestra en la Figura 37. Con estas variables la herramienta calcula el caudal de la planta con el criterio de habitante equivalente, con este valor el usuario debe tomar la decisión de que n usar en el talud horizontal: vertical (1: n), el cual está condicionado por el caudal y el tipo de suelo. Esta segunda pantalla se ve en la Figura 38. Los costos de las actividades de construcción vienen predeterminados pero pueden ser editados por el usuario, este pantallazo de la herramienta se puede ver en la Figura 39. Al ejecutar los calculo esta herramienta presenta en gráficos los costos de inversión inicial operación y mantenimiento con y sin desinfección, así como lo porcentajes en la estructura de costos de cada uno. Este resultado para el ejemplo se muestra en la Figura 40 sin desinfección y en la Figura 41 con desinfección.

La herramienta puede ser encontrada en la página web <http://lasuperestacionlatinafm.com/graficas>. El script de este se encuentra en el Anexo 1.

Costos inversión inicial, operación y mantenimiento de sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas comunidades en Colombia.

Pontificia Universidad Javeriana Bogotá
Por:
Jose Manuel Patiño Gómez
Jaime A. Lara Borrero

Ingrese sus variables de entrada

Variable	Valor	Unidad	Rango
Población:	<input type="text" value="5000"/>	hab. Equivalente	500 - 30,000
Temperatura media del mes más frío:	<input type="text" value="15"/>	°C	7 - 25
Evaporación Neta:	<input type="text" value="0"/>	mm/día	-10 - 20
Sólidos Suspendidos:	<input type="text" value="200"/>	mg/l	100 - 350
DBO	<input type="text" value="300"/>	mg/l	110 - 400
Carga Orgánica:	<input type="text" value="45"/>	g/hab día	39 - 54
Huevos de Helimnto:	<input type="text" value="350"/>	N/ litro	300 - 600
Coliformes fecales:	<input type="text" value="10000000"/>	CF / 100ml	10E6 - 10E9

Figura 37. Primer pantallazo ingreso variables entrada herramienta de soporte

Caudal

Caudal: **9** l/s

Caudal: **750** m3/día

Para dimensionar el sistemas es necesario especificar la relación Horizontal : Vertical de los taludes, el cual es función del tipo de suelo y esta condicionado por el caudal de la planta de la siguiente forma:

Condiciones: Rango

si caudal (l/s) < 2.1: 0,5

si caudal (l/s) < 4,2: 0.5 - 1

si caudal (l/s) < 6.9: 0.5 - 1.5

si caudal (l/s) < 10.3: 0.5 - 2

si caudal (l/s) < 14.5: 0.5 - 2.5

si caudal (l/s) > 14.6: 0.5 - 3

n talud (H : V) 1:n

Figura 38. Segundo pantallazo calculo caudal y asignación n talud herramienta de soporte

Análisis de precios unitarios

	Valor Predeterminado	Unidad
Localización y Replanteo:	<input type="text" value="1600"/>	m²
Campamento obra:	<input type="text" value="913945"/>	Un
Descapote y limpieza:	<input type="text" value="11706"/>	m²
Excavaciones a mano :	<input type="text" value="11386"/>	m²
Excavaciones a máquina	<input type="text" value="12746"/>	m²
Base concreto pobre e=0.05:	<input type="text" value="167143"/>	m²
Concreto 3000 PSI impemeabilizado :	<input type="text" value="301459"/>	m²
Refuerzo acero 60000 PSI figurado :	<input type="text" value="2473382"/>	Ton
Rejilla en acero a 36 Diam. 3/8" y separación de 1":	<input type="text" value="4292068"/>	Ton
Compactación material existente:	<input type="text" value="4287"/>	m²
Geomembrana:	<input type="text" value="13889"/>	m²
Conformación diques material en sitio:	<input type="text" value="5911"/>	m²
Tubería Alcantarillado 4":	<input type="text" value="16055"/>	m
Tubería Alcantarillado 6":	<input type="text" value="28406"/>	m
Tubería Alcantarillado 8":	<input type="text" value="37277"/>	m
Tubería Alcantarillado 10":	<input type="text" value="59461"/>	m
Tubería Alcantarillado 12":	<input type="text" value="89290"/>	m
Tubería Alcantarillado 14":	<input type="text" value="107081"/>	m

Figura 39. Opción de editar los análisis de precios unitarios herramienta de soporte



Figura 40. Gráficos resultados sin desinfección herramienta de soporte

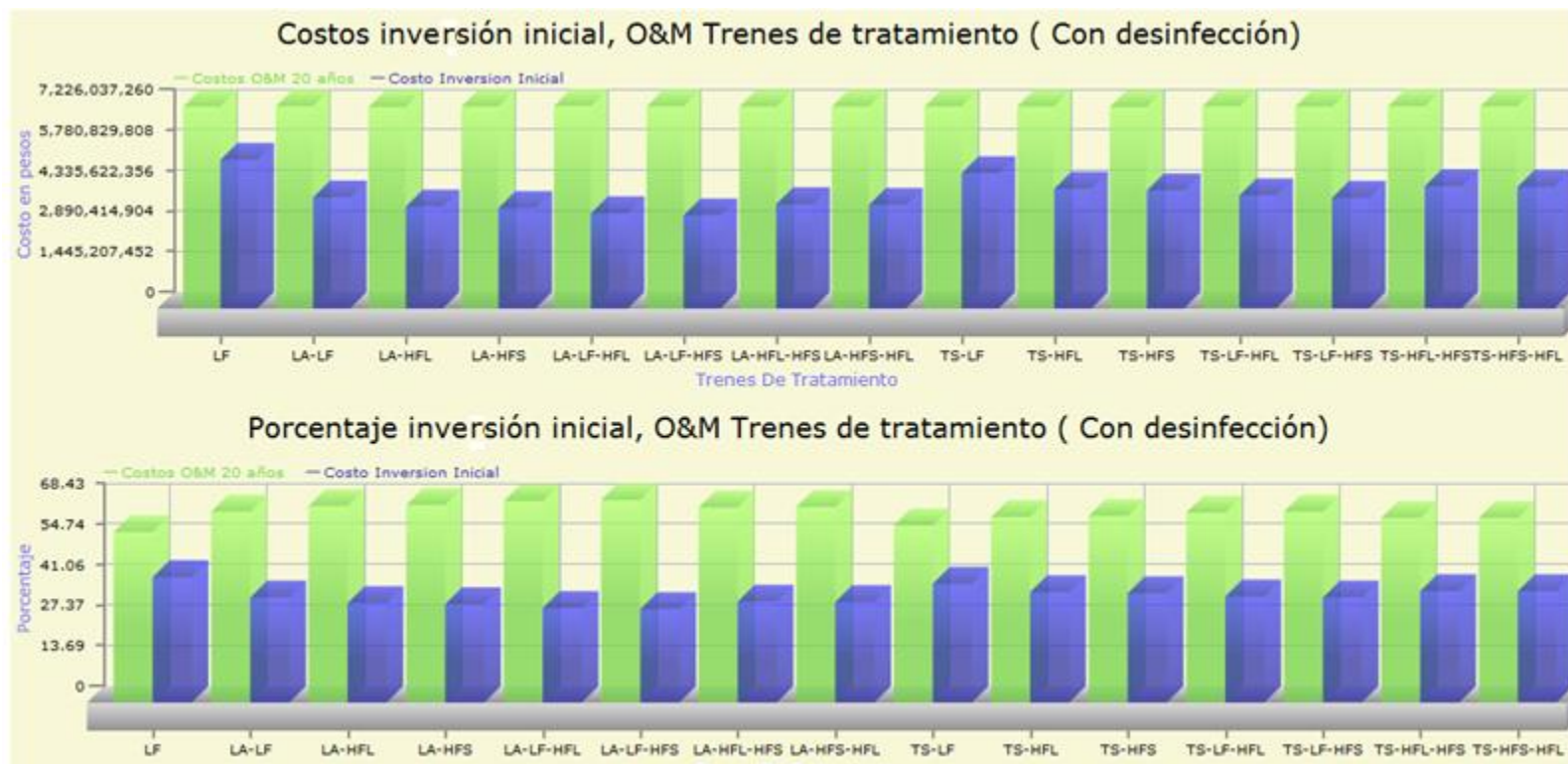


Figura 41. Gráficos resultados con desinfección herramienta de soporte

7. Conclusiones

Al realizar los análisis de resultados encontramos diferencias importantes entre los sistemas naturales para los costos de inversión inicial, mientras que para los costos de O&M se encontró que son muy parecidos. Esto muestra que la O&M no es un factor determinante en la toma de decisiones de que sistema natural emplear.

La variación más importante encontrada en los costos de inversión inicial entre los trenes evaluados es el aumento de los costos en los que en su tratamiento primario tienen tanque séptico, diseñado en concreto reforzado impermeabilizado y un modelo general de diseño que contempla un tiempo de retención de 1 día. Estos sistemas presentan los mayores costos en dos categorías de los costos de inversión inicial. Mostrando esto que los tanques sépticos son sistemas que deben ser empleados solamente cuando las condiciones del entorno lo requieran, por ejemplo cuando la planta solamente puede ser ubicada cerca de la población y no puede presentar malos olores. Aunque cuando se tiene una temperatura baja y la carga orgánica muy diluida esta diferencia es menos notable y los trenes con tanque séptico aunque son los más costos, se vuelven una opción.

El tren de laguna facultativa primaria también presenta costos elevados llegando al orden de magnitud de los sistemas con tanque séptico. Todo esto por el gran requerimiento de área de una laguna facultativa primaria, la cual diseña evitando que se convierta en anaerobia diluyendo la concentración de carga orgánica, aumentando de esta forma su volumen de manera importante. Cabe destacar que cuando la temperatura es baja y la carga orgánica está muy diluida este tren presenta el cuarto precio más bajo para todo el rango de población, lo cual lo vuelve en una opción válida para estos escenarios.

El sistema laguna anaerobia laguna facultativa presenta costos de inversión inicial inferiores al sistema de laguna facultativa primaria, lo que permite concluir que aplicar este tratamiento primario vuelve más eficiente el sistema. En escenarios de temperatura media y concentración de la carga orgánica media, el tren laguna anaerobia laguna facultativa es el que presenta los precios más bajos a partir de 10,000 habitantes. Al aplicar la desinfección en este mismo escenario este tren es el que presenta los precios más bajos para todo el rango de población objeto de análisis, lo que indica que en caso de requerir la desinfección para usar el efluente de la planta, por ejemplo en agricultura este es el tren más eficiente.

Emplear en el tratamiento secundario laguna facultativa y humedal de flujo subsuperficial presenta costos de inversión inicial menores que cuando se emplea solamente la laguna facultativa en sistemas para poblaciones menores a 10,000 habitantes y un escenario con temperatura media o alta y concentración de carga orgánica media o alta. Esto indica que los humedales de flujo subsuperficial son sistemas que se pueden utilizar para el pulimiento del efluente, y de esta forma disminuir los costos y mejorar el paisaje, así como crear un ecosistema para diferentes animales e insectos en los escenarios que se acerquen a lo descrito. Para este caso el humedal de flujo subsuperficial presenta costos menores al humedal de flujo libre, además presenta los menores costos en la categoría de costos directos de construcción entre todos los trenes. En escenarios de temperatura alta y concentración de

carga orgánica alta el tren laguna anaerobia, humedal de flujo subsuperficial, humedal de flujo libre presenta los menores costos para poblaciones menores a 7,000 habitantes, y para poblaciones mayores el tren laguna anaerobia humedal de flujo subsuperficial presenta los menores costos. Esto indica que el sistema natural más eficiente en temperaturas altas y poblaciones mayores a 7,000 habitantes es el humedal de flujo subsuperficial, y también marca la diferencia cuando es combinado con otros sistemas para otras poblaciones.

Los humedales presentan costos directos de construcción levemente superiores a las lagunas, pero son los que menos terreno requieren, superando la disminución en los costos de terreno el aumento en los costos directos, ya que el costo de terreno es una variable de mucha influencia en los costos totales.

Incluir la desinfección por medio de lagunas de maduración incrementa los costos de inversión inicial más de tres veces, mientras los costos de O&M solamente un 20 %. Comparando las categorías el aumento de los costos directos de construcción es de 2 a 3 veces, mientras los costos de terreno requerido aumentan de 3 a 7 veces. Mostrando que el costo del terreno también es una variable de mucha importancia para el costo total cuando se aplica la desinfección.

La categoría más importante en los costos de O&M es la de personal de operación de la planta, aspecto de suma importancia para el buen funcionamiento de la planta. Este debe ser bien financiado para así asegurar la adecuada operación de la planta y los procesos que allí se llevan a cabo. Al incluir la desinfección esta categoría aumenta levemente lo que indica que esto aumenta los costos para las tres categorías en la misma proporción.

Las excavaciones, y la impermeabilización son las actividades que mayor porcentaje de influencia tienen en los costos directos de construcción, sobre todo para los sistemas que tienen laguna anaerobia en su tratamiento primario. Estas siguen siendo importante para los que tienen tanque séptico, aunque en estos la más importante es concretos. Para los sistemas que tienen humedal, la conformación de este representa un costo importante. El porcentaje de las obras exteriores es similar para los diferentes trenes y tiene una importancia significativa. Actividades como preliminares, carpintería metálica, rellenos e interconexión no representan porcentajes importantes.

Al incluir la desinfección las actividades excavaciones e impermeabilización se convierten en variables de mucha importancia, ya que en los trenes que tienen laguna anaerobia estas dos llegan a representar entre el 70% y el 80%. Y para el sistema de laguna facultativa primaria cerca del 90%. Para los sistemas que tienen tanque séptico en su tratamiento primario el capítulo excavaciones, concretos e impermeabilización llegan a representar entre el 80 y el 90% de la estructura de costos. La conformación del humedal y la carpintería metálica son las únicas actividades que pierden influencia en la estructura de costos, mientras los rellenos, interconexiones y obras exteriores ganan un poco convirtiéndose en variables de mayor importancia.

Los humedales son sistemas que pueden ser más eficientes en cuanto a requerimiento de terreno y costos de construcción respecto a las lagunas y el tanque séptico, además tienen un

valor agregado y es el mejoramiento del paisaje y la creación de hábitat para muchas especies. La laguna anaerobia como sistema primario es el más eficiente, por su alta eficiencia y menores costos.

En la toma de decisiones deben ser tenidas en cuenta diferentes variables y para un análisis comparativo puntual la herramienta de soporte desarrollada se convierte en un buen apoyo en la etapa de pre factibilidad de un proyecto de tratamiento de aguas residuales por medio de sistemas naturales para pequeñas comunidades en Colombia.

8. Referencias Bibliográficas

- Alamancos, J.M., 1999. *Diseño de sistemas de depuración de aguas residuales por lagunaje* Primera edición., Librero editor.
- CENTA, 2006. *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales*, España.
- Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA), 2006. *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales*, España.
- FONADE, 2007. Factor multiplicador. Available at: http://www.fonade.gov.co/eContent/library/Attach/FACTOR_MULTIPPLICADOR.pdf [Accedido Junio 28, 2011].
- García, A., 2003. Colombia País Maravilloso. *Colombia*. Available at: <http://pwp.supercabletv.net.co/garcru/colombia/Colombia/index.html>.
- García, A., Regiones Naturales de Colombia. *Toda Colombia Es mi pasión*. Available at: Fuente: <http://www.todacolombia.com/geografia/regionesnaturales.html> [Accedido Febrero 25, 2011].
- Guerrero, J., 2010. Saneamiento en Colombia y Latinoamérica. En Conferencia internacional sobre humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales: transferencia de conocimiento a Latinoamérica. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Guerrero, J., 2003. *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, en pequeñas localidades en Colombia*. Doctoral. Alemania: Technische Universität Berlin.
- IDEAM, 2005. *Atlas Climatológico de Colombia*, Bogotá, Colombia.
- IDRC - OPS/HEP/CEPIS, 2004. *Avances del inventario Regional de la situación de las Aguas Residuales Domésticas en América Latina*,
- Kadlec, R. & Wallace, S., 2009. *Treatment Wetlands* Second Edition., United States of America: CRC Pres.
- Lara, J.A., 1999. *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Mara, D., 2003. *Domestic Wastewater Treatment in developing countries*, United Kingdom: Earthscan.
- Mara, D., 1976. *Sewage Treatment in Hot Climates*, United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Marais, G.V.R., 1974. *Journal of the environmental engineering*, Estados Unidos: ASCE.
- Marín, R., 2003. Colombia: Potencia Hídrica. Available at: <http://www.sogeocol.com.co/documentos/06colo.pdf>.
- Metcalf & Eddy, 1991. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse* 3o ed., McGraw Hill.
- OMS, 1989. *Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura*, Ginebra, Suiza.
- OMS, 2006. *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*, Suiza.
- OPS/CEPIS, 2005. *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización*, Lima, Peru.
- Reed, S. & Middlebrooks, E., 1995. *Natural systems for waste management and treatment* 2o ed., New York: McGraw Hill.
- Rolim, S., 2000. *Sistemas de Lagunas de Estabilización*, Bogotá, Colombia: McGraw Hill.
- Romero, J.A., 2004. *Tratamiento de aguas residuales* Tercera Edición., Colombia: Escuela Colombiana de ingenieros.
- Tebbutt, T., 1977. *Principles of Water Quality Control* 2o ed., Oxford, Inglaterra: Pergamon Press.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2002. *Onsite Wastewater Treatment Systems*

Manual, Estados Unidos.

U.S. Environmental Protection Agency EPA, 2002. *Onsite Wastewater Treatment Systems Manual*,

WHO/EMRO, 1987. *Wastewater Stabilization Ponds: Principles of Planning and Practice*, Egipto.

10. Anexos

Anexo 1. CD Scripts algoritmo simulación en php, script sql creación estructura Base de datos mysql y archivos ejecutables herramienta de soporte

Materiales	Un	Bogotá	Atlántico	V. Cauca	Antioquia	Putumayo		Nariño	Chocó
			B/quilla	Cali	Medellín	Mocoa	Prt. Asis	Tumaco	Quibdó
Cemento	Kg	\$ 500	\$ 390	\$ 390	\$ 390	\$ 460	\$ 470	\$ 600	\$ 450
	bulto	\$ 25,000	\$ 19,500	\$ 19,500	\$ 19,500	\$ 23,000	\$ 23,500	\$ 30,000	\$ 22,500
Arena	m³	\$ 62,000	\$ 20,300	\$ 52,500	\$ 33,640	\$ 30,000	\$ 28,000	\$ 36,667	\$ 40,000
Gravilla	m³	\$ 47,000	\$ 60,600	\$ 35,000	\$ 33,500	\$ 80,000	\$ 80,000	\$ 36,667	\$ 35,000
Grava 3/4 -1" seleccionada	m³	\$ 60,000	\$ 68,000	\$ 60,000	\$ 38,000		\$ 71,000	\$ 45,000	\$ 52,000
Piedra 4" Seleccionada	m³	\$ 63,000	\$ 68,000	\$ 60,000	\$ 42,500		\$ 71,000	\$ 45,000	\$ 52,000
Afirmado	m³	\$ 40,600	\$ 43,000	\$ 40,000	\$ 23,800		\$ 41,000	\$ 36,667	\$ 41,160
Materiales	Un	Córdoba	M/dalena	César	Risaralda	Quindío	Casanare	Arauca	Santander
		Montería	St marta	Valledupar	Pereira	Armenia	Monterrey	Tame	Ocaña
Cemento	Kg	\$ 460	\$ 420	\$ 420	\$ 420	\$ 380	\$ 550	\$ 500	\$ 490
	bulto	\$ 23,000	\$ 21,000	\$ 21,000	\$ 21,000	\$ 19,000	\$ 27,500	\$ 25,000	\$ 24,500
Arena	m³	\$ 40,000	\$ 30,000	\$ 30,000	\$ 40,060	\$ 26,514	\$ 48,452	\$ 40,000	\$ 63,000
Gravilla	m³	\$ 40,000	\$ 80,000	\$ 55,000	\$ 40,060	\$ 80,000	\$ 59,219	\$ 41,000	\$ 45,000
Grava 3/4 -1" seleccionada	m³	\$ 45,000	\$ 60,000	\$ 41,667	\$ 44,000	\$ 42,000	\$ 77,000	\$ 60,000	\$ 69,000
Piedra 4" Seleccionada	m³	\$ 45,000	\$ 40,000	\$ 41,667	\$ 44,000	\$ 55,000	\$ 77,000	\$ 60,000	\$ 69,000
Afirmado	m³	\$ 40,000	\$ 42,500	\$ 33,333	\$ 24,500	\$ 28,000	\$ 44,000	\$ 36,000	\$ 40,000

Anexo 2. Resumen cotizaciones materiales

Costos Mano de obra Construdata (2011)						
	#	MO.01	MO.02	MO.03	MO.04	MO.05
CARGO		Oficial	Ayudante entendido	Ayudante raso	Topógrafo	Cadenero
Salario básico mensual		\$ 1,645,000	\$ 950,000	\$ 535,600	\$ 1,027,684	\$ 645,973
Transporte	11.94%	\$ -	\$ 113,430	\$ 63,951	\$ 122,705	\$ 77,129
Prestaciones						
Cesantías	8.33%	\$ 137,029	\$ 79,135	\$ 44,615	\$ 85,606	\$ 53,810
Interes a las cesantías	1.00%	\$ 16,450	\$ 9,500	\$ 5,356	\$ 10,277	\$ 6,460
Vacaciones	4.17%	\$ 68,597	\$ 39,615	\$ 22,335	\$ 42,854	\$ 26,937
Prima de servicios	8.33%	\$ 137,029	\$ 79,135	\$ 44,615	\$ 85,606	\$ 53,810
Seguro social						
Aporte a Salud	8.50%	\$ 139,825	\$ 80,750	\$ 45,526	\$ 87,353	\$ 54,908
Aporte Pensión	12.00%	\$ 197,400	\$ 114,000	\$ 64,272	\$ 123,322	\$ 77,517
Aporte Riesgo	6.96%	\$ 114,492	\$ 66,120	\$ 37,278	\$ 71,527	\$ 44,960
Parafiscales						
SENA	2.00%	\$ 32,900	\$ 19,000	\$ 10,712	\$ 20,554	\$ 12,919
FIC	1.00%	\$ 16,450	\$ 9,500	\$ 5,356	\$ 10,277	\$ 6,460
I.C.B.F.	3.00%	\$ 49,350	\$ 28,500	\$ 16,068	\$ 30,831	\$ 19,379
Caja de compensación	2.00%	\$ 32,900	\$ 19,000	\$ 10,712	\$ 20,554	\$ 12,919
TOTAL (incl. Transporte)	69.23%	\$ 2,587,421	\$ 1,607,685	\$ 1,141,396	\$ 1,739,150	\$ 1,093,180
TOTAL (sin transporte)	57%					
CARGO		Oficial	Ayudante entendido	Ayudante raso	Topógrafo	Cadenero
Salario básico mensual		\$ 1,645,000	\$ 950,000	\$ 535,600	\$ 1,027,684	\$ 645,973
Valor básico día		\$ 54,833	\$ 31,667	\$ 17,853	\$ 34,256	\$ 21,532
Valor básico hora		\$ 6,854	\$ 3,958	\$ 2,232	\$ 4,282	\$ 2,692
Valor total mes		\$ 2,587,421	\$ 1,607,685	\$ 1,141,396	\$ 1,739,150	\$ 1,093,180
Valor día		\$ 86,247	\$ 53,590	\$ 38,047	\$ 57,972	\$ 36,439
Valor hora		\$ 10,781	\$ 6,699	\$ 4,756	\$ 7,246	\$ 4,555

Anexo 3. Análisis Mano de obra basado en CONSTRUDATA

Costos Mano de obra Empresa ingeniería # 2 (2011)						
	#	MO.01	MO.02	MO.03	MO.04	MO.05
CARGO		Oficial	Ayudante entendido	Ayudante raso	Topógrafo	Cadenero
Salario básico mensual		\$ 1,150,000	\$ 950,000	\$ 535,600	\$ 1,000,000	\$ 700,000
Transporte	11.94%	\$ -	\$ 113,430	\$ 63,951	\$ 119,400	\$ 83,580
Prestaciones						
Cesantías	8.33%	\$ 95,795	\$ 79,135	\$ 44,615	\$ 83,300	\$ 58,310
Interes a las cesantías	1.00%	\$ 11,500	\$ 9,500	\$ 5,356	\$ 10,000	\$ 7,000
Vacaciones	4.17%	\$ 47,955	\$ 39,615	\$ 22,335	\$ 41,700	\$ 29,190
Prima de servicios	8.33%	\$ 95,795	\$ 79,135	\$ 44,615	\$ 83,300	\$ 58,310
Seguro social						
Aporte a Salud	8.50%	\$ 97,750	\$ 80,750	\$ 45,526	\$ 85,000	\$ 59,500
Aporte Pensión	12.00%	\$ 138,000	\$ 114,000	\$ 64,272	\$ 120,000	\$ 84,000
Aporte Riesgo	6.96%	\$ 80,040	\$ 66,120	\$ 37,278	\$ 69,600	\$ 48,720
Parafiscales						
SENA	2.00%	\$ 23,000	\$ 19,000	\$ 10,712	\$ 20,000	\$ 14,000
FIC	1.00%	\$ 11,500	\$ 9,500	\$ 5,356	\$ 10,000	\$ 7,000
I.C.B.F.	3.00%	\$ 34,500	\$ 28,500	\$ 16,068	\$ 30,000	\$ 21,000
Caja de compensación	2.00%	\$ 23,000	\$ 19,000	\$ 10,712	\$ 20,000	\$ 14,000
TOTAL (incl. Transporte)	69.23%	\$ 1,808,835	\$ 1,607,685	\$ 906,396	\$ 1,692,300	\$ 1,184,610
TOTAL (sin transporte)	57%					
CARGO		Oficial	Ayudante entendido	Ayudante raso	Topógrafo	Cadenero
Salario basico mensual		\$ 1,150,000	\$ 950,000	\$ 535,600	\$ 1,000,000	\$ 700,000
Valor básico día		\$ 38,333	\$ 31,667	\$ 17,853	\$ 33,333	\$ 23,333
Valor básico hora		\$ 4,792	\$ 3,958	\$ 2,232	\$ 4,167	\$ 2,917
Valor total mes		\$ 1,808,835	\$ 1,607,685	\$ 906,396	\$ 1,692,300	\$ 1,184,610
Valor día		\$ 60,295	\$ 53,590	\$ 30,213	\$ 56,410	\$ 39,487
Valor hora		\$ 7,537	\$ 6,699	\$ 3,777	\$ 7,051	\$ 4,936

Anexo 4. Análisis Mano de obra basado en información suministrada por Empresa de ingeniería # 2.

Costos Mano de obra Empresa ingenieria # 3 (FEB 2011)						
	#	MO.01	MO.02	MO.03	MO.04	MO.05
CARGO		Oficial	Ayudante entendido	Ayudante raso	Topógrafo	Cadenero
Salario básico mensual		\$ 2,650,000	\$ 2,000,000	\$ 1,600,000	\$ 2,320,000	\$ 1,940,000
Transporte	11.94%	\$ -	\$ 238,800	\$ 191,040	\$ 277,008	\$ 231,636
Prestaciones						
Cesantías	8.33%	\$ 220,745	\$ 166,600	\$ 133,280	\$ 193,256	\$ 161,602
Interes a las cesantías	1.00%	\$ 26,500	\$ 20,000	\$ 16,000	\$ 23,200	\$ 19,400
Vacaciones	4.17%	\$ 110,505	\$ 83,400	\$ 66,720	\$ 96,744	\$ 80,898
Prima de servicios	8.33%	\$ 220,745	\$ 166,600	\$ 133,280	\$ 193,256	\$ 161,602
Seguro social						
Aporte a Salud	8.50%	\$ 225,250	\$ 170,000	\$ 136,000	\$ 197,200	\$ 164,900
Aporte Pensión	12.00%	\$ 318,000	\$ 240,000	\$ 192,000	\$ 278,400	\$ 232,800
Aporte Riesgo	6.96%	\$ 184,440	\$ 139,200	\$ 111,360	\$ 161,472	\$ 135,024
Parafiscales						
SENA	2.00%	\$ 53,000	\$ 40,000	\$ 32,000	\$ 46,400	\$ 38,800
FIC	1.00%	\$ 26,500	\$ 20,000	\$ 16,000	\$ 23,200	\$ 19,400
I.C.B.F.	3.00%	\$ 79,500	\$ 60,000	\$ 48,000	\$ 69,600	\$ 58,200
Caja de compensación	2.00%	\$ 53,000	\$ 40,000	\$ 32,000	\$ 46,400	\$ 38,800
TOTAL (incl. Transporte)	69.23%	\$ 4,168,185	\$ 3,384,600	\$ 2,707,680	\$ 3,926,136	\$ 3,283,062
TOTAL (sin transporte)	57%					
CARGO		Oficial	Ayudante entendido	Ayudante raso	Topógrafo	Cadenero
Salario basico mensual		\$ 2,650,000	\$ 2,000,000	\$ 1,600,000	\$ 2,320,000	\$ 1,940,000
Valor básico día		\$ 88,333	\$ 66,667	\$ 53,333	\$ 77,333	\$ 64,667
Valor básico hora		\$ 11,042	\$ 8,333	\$ 6,667	\$ 9,667	\$ 8,083
Valor total mes		\$ 4,168,185	\$ 3,384,600	\$ 2,707,680	\$ 3,926,136	\$ 3,283,062
AIU (22%)		\$ 30,567	\$ 24,820	\$ 19,856	\$ 28,792	\$ 24,076
Valor TOTAL mes		\$ 5,085,186	\$ 4,129,212	\$ 3,303,370	\$ 4,789,886	\$ 4,005,336
Valor TOTAL día		\$ 169,506	\$ 137,640	\$ 110,112	\$ 159,663	\$ 133,511
Valor TOTAL hora		\$ 21,188	\$ 17,205	\$ 13,764	\$ 19,958	\$ 16,689

Anexo 5. Mano de obra basado en información suministrada por Empresa de ingeniería # 3.

	Descripción	Unidad	APU CD(Bogotá)	APU CD(Medellín)	APU CD(Cali)	APU Risaralda	APU Quindío	APU Ocaña	MIN	MAX	%
1.0	Preliminares										
1.1	Localización y Replanteo	m ²	\$ 1,838	\$ 1,828	\$ 1,802	\$ 1,636	\$ 1,832	\$ 1,832	\$ 1,636	\$ 1,838	12%
1.2	Campamento obra	Un	\$ 1,291,681	\$ 1,196,824	\$ 1,337,913	\$ 913,946	\$ 1,211,201	\$ 1,232,261	\$ 913,946	\$ 1,337,913	46%
2.0	Excavaciones										
2.1	Descapote y limpieza	m ³	\$ 16,620	\$ 16,287	\$ 14,953	\$ 11,707	\$ 14,333	\$ 16,620	\$ 11,707	\$ 16,620	42%
2.2	Excavaciones a mano	m ³	\$ 11,387	\$ 11,387	\$ 11,387	\$ 12,340	\$ 12,340	\$ 12,340	\$ 11,387	\$ 12,340	8%
2.3	Excavaciones a máquina	m ³	\$ 18,240	\$ 17,907	\$ 16,573	\$ 12,747	\$ 15,333	\$ 18,240	\$ 12,747	\$ 18,240	43%
3.0	Concretos										
3.1	Base concreto pobre e=0.05	m ³	\$ 227,522	\$ 167,144	\$ 182,707	\$ 180,677	\$ 206,290	\$ 220,127	\$ 167,144	\$ 227,522	36%
3.2	Concreto 3000 PSI impemeabilizado	m ³	\$ 386,925	\$ 312,925	\$ 329,425	\$ 312,995	\$ 330,333	\$ 360,814	\$ 312,925	\$ 386,925	28%
3.3	Concreto 3000 PSI	m ³	\$ 295,464	\$ 240,487	\$ 256,987	\$ 252,307	\$ 269,645	\$ 300,127	\$ 240,487	\$ 300,127	25%
3.4	Refuerzo acero 60000 PSI figurado	Ton	\$ 2,979,193	\$ 2,979,193	\$ 2,979,193	\$ 2,473,383	\$ 2,671,131	\$ 2,885,331	\$ 2,473,383	\$ 2,979,193	20%
4.0	Carpintería metálica										
4.1	Rejilla en acero a 36 Diam. 3/8" y separación de 1"	Ton	\$ 5,327,804	\$ 5,327,804	\$ 5,327,804	\$ 4,292,069	\$ 4,625,207	\$ 4,839,407	\$ 4,292,069	\$ 5,327,804	24%
5.0	Impermeabilización										
5.1	Compactación material existente	m ³	\$ 5,825	\$ 5,195	\$ 4,745	\$ 4,288	\$ 5,728	\$ 5,728	\$ 4,288	\$ 5,825	36%
5.2	Geomembrana	m ²	\$ 15,427	\$ 15,427	\$ 15,427	\$ 13,890	\$ 13,927	\$ 13,927	\$ 13,890	\$ 15,427	11%
6.0	Rellenos										
6.1	Conformación diques material en sitio	m ³	\$ 8,410	\$ 7,360	\$ 6,610	\$ 5,912	\$ 8,312	\$ 8,312	\$ 5,912	\$ 8,410	42%
7.0	Interconexión										
7.10	Tubería Alcantarillado 4"	m	\$ 17,174	\$ 17,174	\$ 17,174	\$ 16,056	\$ 16,355	\$ 16,355	\$ 16,056	\$ 17,174	7%
7.11	Tubería Alcantarillado 6"	m	\$ 27,525	\$ 27,525	\$ 27,525	\$ 26,407	\$ 26,706	\$ 26,706	\$ 26,407	\$ 27,525	4%
7.12	Tubería Alcantarillado 8"	m	\$ 38,396	\$ 38,396	\$ 38,396	\$ 37,278	\$ 37,576	\$ 37,576	\$ 37,278	\$ 38,396	3%
7.13	Tubería Alcantarillado 10"	m	\$ 60,580	\$ 60,580	\$ 60,580	\$ 59,462	\$ 59,761	\$ 59,761	\$ 59,462	\$ 60,580	2%
7.14	Tubería Alcantarillado 12"	m	\$ 90,408	\$ 90,408	\$ 90,408	\$ 89,291	\$ 89,589	\$ 89,589	\$ 89,291	\$ 90,408	1%
7.15	Tubería Alcantarillado 14"	m	\$ 108,197	\$ 108,197	\$ 108,197	\$ 107,080	\$ 107,378	\$ 107,378	\$ 107,080	\$ 108,197	1%
7.16	Tubería Alcantarillado 16"	m	\$ 136,429	\$ 136,429	\$ 136,429	\$ 135,311	\$ 135,610	\$ 135,610	\$ 135,311	\$ 136,429	1%
7.20	Gaviones entrada y salida piedra 4"	m ³	\$ 115,903	\$ 93,353	\$ 112,603	\$ 137,070	\$ 102,136	\$ 117,536	\$ 93,353	\$ 137,070	50%
7.30	Tubería Perforada Alcantarillado 4"	m	\$ 21,669	\$ 21,669	\$ 21,669	\$ 19,625	\$ 19,924	\$ 19,924	\$ 19,625	\$ 21,669	10%
7.31	Tubería Perforada Alcantarillado 6"	m	\$ 32,019	\$ 32,019	\$ 32,019	\$ 29,976	\$ 30,275	\$ 30,275	\$ 29,976	\$ 32,019	7%
7.32	Tubería Perforada Alcantarillado 8"	m	\$ 42,890	\$ 42,890	\$ 42,890	\$ 40,847	\$ 41,145	\$ 41,145	\$ 40,847	\$ 42,890	5%
7.33	Tubería Perforada Alcantarillado 10"	m	\$ 65,074	\$ 65,074	\$ 65,074	\$ 63,031	\$ 63,330	\$ 63,330	\$ 63,031	\$ 65,074	3%
7.34	Tubería Perforada Alcantarillado 12"	m	\$ 94,903	\$ 94,903	\$ 94,903	\$ 92,859	\$ 93,158	\$ 93,158	\$ 92,859	\$ 94,903	2%
7.35	Tubería Perforada Alcantarillado 14"	m	\$ 112,692	\$ 112,692	\$ 112,692	\$ 110,649	\$ 110,947	\$ 110,947	\$ 110,649	\$ 112,692	2%
7.36	Tubería Perforada Alcantarillado 16"	m	\$ 140,923	\$ 140,923	\$ 140,923	\$ 138,880	\$ 139,179	\$ 139,179	\$ 138,880	\$ 140,923	1%
7.40	Obras de arte de interconexión 80x80	un	\$ 440,919	\$ 416,806	\$ 428,717	\$ 367,017	\$ 392,687	\$ 432,022	\$ 367,017	\$ 440,919	20%
8.0	Obras exteriores										
8.1	Cerramiento planta malla eslabonada	m	\$ 81,831	\$ 68,447	\$ 75,026	\$ 49,262	\$ 70,909	\$ 80,997	\$ 49,262	\$ 81,831	66%
8.2	Cunetas aguas lluvias	m	\$ 33,949	\$ 30,650	\$ 31,640	\$ 30,988	\$ 32,012	\$ 33,862	\$ 30,650	\$ 33,949	11%
8.3	Afirmado y compactado vías	m ²	\$ 56,510	\$ 34,337	\$ 55,026	\$ 35,009	\$ 39,369	\$ 55,730	\$ 34,337	\$ 56,510	65%
8.4	Empradización	m ²	\$ 2,781	\$ 2,781	\$ 2,781	\$ 2,566	\$ 2,566	\$ 2,566	\$ 2,566	\$ 2,781	8%
9.0	Conformación humedal										
9.1	Material de sustrato	m ³	\$ 9,417	\$ 9,417	\$ 9,417	\$ 7,478	\$ 7,478	\$ 7,478	\$ 7,478	\$ 9,417	26%
9.2	Vegetación	Un	\$ 10,000	\$ 1,205	\$ 1,205	\$ 1,183	\$ 1,183	\$ 1,183	\$ 1,183	\$ 10,000	745%
9.3	Grava 3/4 -1"	m ³	\$ 67,046	\$ 42,846	\$ 67,046	\$ 49,231	\$ 47,031	\$ 76,731	\$ 42,846	\$ 76,731	79%

Anexo 6. Análisis de precios unitarios Región Andina y porcentaje de variación

	Descripción	Unidad	APU CD(Barranquilla)	APU Montería	APU Santa Marta	APU Valledupar	MIN	MAX	%
1.0	Preliminares								
1.1	Localización y Replanteo	m ²	\$ 1,858	\$ 1,887	\$ 1,907	\$ 1,852	\$ 1,852	\$ 1,907	17%
1.2	Campamento obra	Un	\$ 1,556,850	\$ 1,234,036	\$ 1,542,846	\$ 1,442,791	\$ 1,234,036	\$ 1,556,850	70%
2.0	Excavaciones								
2.1	Descapote y limpieza	m ³	\$ 16,620	\$ 15,400	\$ 16,620	\$ 16,620	\$ 15,400	\$ 16,620	42%
2.2	Excavaciones a mano	m ³	\$ 11,387	\$ 14,808	\$ 14,808	\$ 12,340	\$ 11,387	\$ 14,808	30%
2.3	Excavaciones a máquina	m ³	\$ 18,240	\$ 16,800	\$ 18,240	\$ 18,240	\$ 16,800	\$ 18,240	43%
3.0	Concretos								
3.1	Base concreto pobre e=0.05	m ³	\$ 188,899	\$ 196,196	\$ 220,436	\$ 186,167	\$ 186,167	\$ 220,436	32%
3.2	Concreto 3000 PSI impemeabilizado	m ³	\$ 333,635	\$ 347,380	\$ 363,080	\$ 322,944	\$ 322,944	\$ 363,080	20%
3.3	Concreto 3000 PSI	m ³	\$ 261,197	\$ 277,628	\$ 293,328	\$ 262,257	\$ 261,197	\$ 293,328	22%
3.4	Refuerzo acero 60000 PSI figurado	Ton	\$ 2,979,193	\$ 2,943,854	\$ 2,943,854	\$ 2,885,331	\$ 2,885,331	\$ 2,979,193	20%
4.0	Carpintería metálica								
4.1	Rejilla en acero a 36 Diam. 3/8" y separación de 1"	Ton	\$ 5,327,804	\$ 5,156,448	\$ 5,156,448	\$ 4,839,407	\$ 4,839,407	\$ 5,327,804	24%
5.0	Impermeabilización								
5.1	Compactación material existente	m ³	\$ 5,195	\$ 5,217	\$ 5,307	\$ 5,098	\$ 5,098	\$ 5,307	24%
5.2	Geomembrana	m ²	\$ 15,427	\$ 14,984	\$ 14,984	\$ 13,927	\$ 13,927	\$ 15,427	11%
6.0	Rellenos								
6.1	Conformación diques material en sitio	m ³	\$ 7,360	\$ 7,214	\$ 7,364	\$ 7,262	\$ 7,214	\$ 7,364	25%
7.0	Interconexión								
7.10	Tubería Alcantarillado 4"	m	\$ 17,174	\$ 16,830	\$ 16,830	\$ 16,355	\$ 16,355	\$ 17,174	7%
7.11	Tubería Alcantarillado 6"	m	\$ 27,525	\$ 27,181	\$ 27,181	\$ 26,706	\$ 26,706	\$ 27,525	4%
7.12	Tubería Alcantarillado 8"	m	\$ 38,396	\$ 38,052	\$ 38,052	\$ 37,576	\$ 37,576	\$ 38,396	3%
7.13	Tubería Alcantarillado 10"	m	\$ 60,580	\$ 60,236	\$ 60,236	\$ 59,761	\$ 59,761	\$ 60,580	2%
7.14	Tubería Alcantarillado 12"	m	\$ 90,408	\$ 90,064	\$ 90,064	\$ 89,589	\$ 89,589	\$ 90,408	1%
7.15	Tubería Alcantarillado 14"	m	\$ 108,197	\$ 107,853	\$ 107,853	\$ 107,378	\$ 107,378	\$ 108,197	1%
7.16	Tubería Alcantarillado 16"	m	\$ 136,429	\$ 136,085	\$ 136,085	\$ 135,610	\$ 135,610	\$ 136,429	1%
7.20	Gaviones entrada y salida piedra 4"	m ³	\$ 123,603	\$ 94,863	\$ 91,563	\$ 101,036	\$ 91,563	\$ 123,603	36%
7.30	Tubería Perforada Alcantarillado 4"	m	\$ 21,669	\$ 21,113	\$ 21,113	\$ 19,924	\$ 19,924	\$ 21,669	10%
7.31	Tubería Perforada Alcantarillado 6"	m	\$ 32,019	\$ 31,464	\$ 31,464	\$ 30,275	\$ 30,275	\$ 32,019	7%
7.32	Tubería Perforada Alcantarillado 8"	m	\$ 42,890	\$ 42,334	\$ 42,334	\$ 41,145	\$ 41,145	\$ 42,890	5%
7.33	Tubería Perforada Alcantarillado 10"	m	\$ 65,074	\$ 64,519	\$ 64,519	\$ 63,330	\$ 63,330	\$ 65,074	3%
7.34	Tubería Perforada Alcantarillado 12"	m	\$ 94,903	\$ 94,347	\$ 94,347	\$ 93,158	\$ 93,158	\$ 94,903	2%
7.35	Tubería Perforada Alcantarillado 14"	m	\$ 112,692	\$ 112,136	\$ 112,136	\$ 110,947	\$ 110,947	\$ 112,692	2%
7.36	Tubería Perforada Alcantarillado 16"	m	\$ 140,923	\$ 140,368	\$ 140,368	\$ 139,179	\$ 139,179	\$ 140,923	1%
7.40	Obras de arte de interconexión 80x80	un	\$ 396,256	\$ 431,913	\$ 405,257	\$ 386,833	\$ 386,833	\$ 431,913	18%
8.0	Obras exteriores								
8.1	Cerramiento planta malla eslabonada	m	\$ 76,177	\$ 80,329	\$ 77,799	\$ 75,118	\$ 75,118	\$ 80,329	63%
8.2	Cunetas aguas lluvias	m	\$ 31,893	\$ 35,631	\$ 36,573	\$ 31,590	\$ 31,590	\$ 36,573	19%
8.3	Afirmado y compactado vías	m ²	\$ 59,297	\$ 55,730	\$ 58,647	\$ 56,905	\$ 55,730	\$ 59,297	73%
8.4	Empradización	m ²	\$ 2,781	\$ 2,732	\$ 2,732	\$ 2,566	\$ 2,566	\$ 2,781	8%
9.0	Conformación humedal								
9.1	Material de sustrato	m ³	\$ 9,417	\$ 8,973	\$ 8,973	\$ 7,478	\$ 7,478	\$ 9,417	26%
9.2	Vegetación	Un	\$ 1,205	\$ 1,200	\$ 1,200	\$ 1,183	\$ 1,183	\$ 1,205	2%
9.3	Grava 3/4 -1"	m ³	\$ 75,846	\$ 50,497	\$ 66,997	\$ 58,031	\$ 50,497	\$ 75,846	77%

Anexo 7. Análisis de precios unitarios Región Caribe y porcentaje de variación

	Descripción	Unidad	APU Monterrey	APU Tame	MIN	MAX	media total	variacion	%
1.0	Preliminares								
1.1	Localización y Replanteo	m ²	\$ 2,467	\$ 1,832	\$ 1,832	\$ 2,467	\$ 2,149	\$ 636	51%
1.2	Campamento obra	Un	\$ 1,752,791	\$ 1,229,687	\$ 1,229,687	\$ 1,752,791	\$ 1,491,239	\$ 523,104	92%
2.0	Excavaciones								
2.1	Descapote y limpieza	m ³	\$ 29,270	\$ 16,620	\$ 16,620	\$ 29,270	\$ 22,945	\$ 12,650	150%
2.2	Excavaciones a mano	m ³	\$ 34,199	\$ 12,340	\$ 12,340	\$ 34,199	\$ 23,269	\$ 21,859	200%
2.3	Excavaciones a máquina	m ³	\$ 30,439	\$ 18,240	\$ 18,240	\$ 30,439	\$ 24,339	\$ 12,199	139%
3.0	Concretos								
3.1	Base concreto pobre e=0.05	m ³	\$ 273,480	\$ 204,242	\$ 204,242	\$ 273,480	\$ 238,861	\$ 69,238	64%
3.2	Concreto 3000 PSI impemeabilizado	m ³	\$ 576,996	\$ 301,460	\$ 301,460	\$ 576,996	\$ 439,228	\$ 275,536	91%
3.3	Concreto 3000 PSI	m ³	\$ 405,862	\$ 263,432	\$ 263,432	\$ 405,862	\$ 334,647	\$ 142,430	69%
3.4	Refuerzo acero 60000 PSI figurado	Ton	\$ 3,395,034	\$ 2,885,331	\$ 2,885,331	\$ 3,395,034	\$ 3,140,183	\$ 509,703	37%
4.0	Carpintería metálica								
4.1	Rejilla en acero a 36 Diam. 3/8" y separación de 1"	Ton	\$ 7,895,850	\$ 4,839,407	\$ 4,839,407	\$ 7,895,850	\$ 6,367,629	\$ 3,056,443	84%
5.0	Impermeabilización								
5.1	Compactación material existente	m ³	\$ 8,388	\$ 5,728	\$ 5,728	\$ 8,388	\$ 7,058	\$ 2,661	96%
5.2	Geomembrana	m ²	\$ 23,967	\$ 13,927	\$ 13,927	\$ 23,967	\$ 18,947	\$ 10,039	73%
6.0	Rellenos								
6.1	Conformación diques material en sitio	m ³	\$ 11,160	\$ 8,312	\$ 8,312	\$ 11,160	\$ 9,736	\$ 2,849	89%
7.0	Interconexión								
7.10	Tubería Alcantarillado 4"	m	\$ 20,517	\$ 16,355	\$ 16,355	\$ 20,517	\$ 18,436	\$ 4,163	28%
7.11	Tubería Alcantarillado 6"	m	\$ 30,868	\$ 26,706	\$ 26,706	\$ 30,868	\$ 28,787	\$ 4,163	17%
7.12	Tubería Alcantarillado 8"	m	\$ 41,739	\$ 37,576	\$ 37,576	\$ 41,739	\$ 39,658	\$ 4,163	12%
7.13	Tubería Alcantarillado 10"	m	\$ 63,923	\$ 59,761	\$ 59,761	\$ 63,923	\$ 61,842	\$ 4,163	8%
7.14	Tubería Alcantarillado 12"	m	\$ 93,751	\$ 89,589	\$ 89,589	\$ 93,751	\$ 91,670	\$ 4,163	5%
7.15	Tubería Alcantarillado 14"	m	\$ 111,541	\$ 107,378	\$ 107,378	\$ 111,541	\$ 109,459	\$ 4,163	4%
7.16	Tubería Alcantarillado 16"	m	\$ 139,772	\$ 135,610	\$ 135,610	\$ 139,772	\$ 137,691	\$ 4,163	3%
7.20	Gaviones entrada y salida piedra 4"	m ³	\$ 181,831	\$ 107,636	\$ 107,636	\$ 181,831	\$ 144,734	\$ 74,195	100%
7.30	Tubería Perforada Alcantarillado 4"	m	\$ 31,179	\$ 19,924	\$ 19,924	\$ 31,179	\$ 25,551	\$ 11,255	59%
7.31	Tubería Perforada Alcantarillado 6"	m	\$ 41,530	\$ 30,275	\$ 30,275	\$ 41,530	\$ 35,902	\$ 11,255	39%
7.32	Tubería Perforada Alcantarillado 8"	m	\$ 52,400	\$ 41,145	\$ 41,145	\$ 52,400	\$ 46,773	\$ 11,255	28%
7.33	Tubería Perforada Alcantarillado 10"	m	\$ 74,585	\$ 63,330	\$ 63,330	\$ 74,585	\$ 68,957	\$ 11,255	18%
7.34	Tubería Perforada Alcantarillado 12"	m	\$ 104,413	\$ 93,158	\$ 93,158	\$ 104,413	\$ 98,785	\$ 11,255	12%
7.35	Tubería Perforada Alcantarillado 14"	m	\$ 122,202	\$ 110,947	\$ 110,947	\$ 122,202	\$ 116,574	\$ 11,255	10%
7.36	Tubería Perforada Alcantarillado 16"	m	\$ 150,434	\$ 139,179	\$ 139,179	\$ 150,434	\$ 144,806	\$ 11,255	8%
7.40	Obras de arte de interconexión 80x80	un	\$ 654,411	\$ 407,774	\$ 407,774	\$ 654,411	\$ 531,092	\$ 246,638	78%
8.0	Obras exteriores								
8.1	Cerramiento planta malla eslabonada	m	\$ 120,027	\$ 78,703	\$ 78,703	\$ 120,027	\$ 99,365	\$ 41,324	144%
8.2	Cunetas aguas lluvias	m	\$ 57,627	\$ 31,661	\$ 31,661	\$ 57,627	\$ 44,644	\$ 25,967	88%
8.3	Afirmado y compactado vías	m ²	\$ 61,593	\$ 50,530	\$ 50,530	\$ 61,593	\$ 56,062	\$ 11,063	79%
8.4	Empradización	m ²	\$ 4,717	\$ 2,566	\$ 2,566	\$ 4,717	\$ 3,641	\$ 2,151	84%
9.0	Conformación humedal								
9.1	Material de sustrato	m ³	\$ 22,338	\$ 7,478	\$ 7,478	\$ 22,338	\$ 14,908	\$ 14,861	199%
9.2	Vegetación	Un	\$ 5,398	\$ 1,183	\$ 1,183	\$ 5,398	\$ 3,291	\$ 4,215	356%
9.3	Grava 3/4 -1"	m ³	\$ 87,182	\$ 66,831	\$ 66,831	\$ 87,182	\$ 77,006	\$ 20,351	103%

Anexo 8. Análisis de precios unitarios Región Orinoquía y porcentaje de variación

	Descripción	Unidad	APU Nariño	APU Quibdó	MIN	MAX	%
1.0	Preliminares						
1.1	Localización y Replanteo	m ²	\$ 1,832	\$ 1,852	\$ 1,832	\$ 1,852	13%
1.2	Campamento obra	Un	\$ 1,213,541	\$ 1,442,791	\$ 1,213,541	\$ 1,442,791	58%
2.0	Excavaciones						
2.1	Descapote y limpieza	m ³	\$ 15,400	\$ 16,620	\$ 15,400	\$ 16,620	42%
2.2	Excavaciones a mano	m ³	\$ 12,340	\$ 12,340	\$ 12,340	\$ 12,340	8%
2.3	Excavaciones a máquina	m ³	\$ 16,800	\$ 18,240	\$ 16,800	\$ 18,240	43%
3.0	Concretos						
3.1	Base concreto pobre e=0.05	m ³	\$ 222,309	\$ 186,167	\$ 186,167	\$ 222,309	33%
3.2	Concreto 3000 PSI impemeabilizado	m ³	\$ 377,870	\$ 322,944	\$ 322,944	\$ 377,870	25%
3.3	Concreto 3000 PSI	m ³	\$ 317,182	\$ 262,257	\$ 262,257	\$ 317,182	32%
3.4	Refuerzo acero 60000 PSI figurado	Ton	\$ 2,885,331	\$ 2,885,331	\$ 2,885,331	\$ 2,885,331	17%
4.0	Carpintería metálica						
4.1	Rejilla en acero a 36 Diam. 3/8" y separación de 1"	Ton	\$ 4,839,407	\$ 4,839,407	\$ 4,839,407	\$ 4,839,407	13%
5.0	Impermeabilización						
5.1	Compactación material existente	m ³	\$ 5,008	\$ 5,098	\$ 5,008	\$ 5,098	19%
5.2	Geomembrana	m ²	\$ 13,927	\$ 13,927	\$ 13,927	\$ 13,927	0%
6.0	Rellenos						
6.1	Conformación diques material en sitio	m ³	\$ 7,112	\$ 7,262	\$ 7,112	\$ 7,262	23%
7.0	Interconexión						
7.10	Tubería Alcantarillado 4"	m	\$ 16,355	\$ 16,355	\$ 16,355	\$ 16,355	2%
7.11	Tubería Alcantarillado 6"	m	\$ 26,706	\$ 26,706	\$ 26,706	\$ 26,706	1%
7.12	Tubería Alcantarillado 8"	m	\$ 37,576	\$ 37,576	\$ 37,576	\$ 37,576	1%
7.13	Tubería Alcantarillado 10"	m	\$ 59,761	\$ 59,761	\$ 59,761	\$ 59,761	1%
7.14	Tubería Alcantarillado 12"	m	\$ 89,589	\$ 89,589	\$ 89,589	\$ 89,589	0%
7.15	Tubería Alcantarillado 14"	m	\$ 107,378	\$ 107,378	\$ 107,378	\$ 107,378	0%
7.16	Tubería Alcantarillado 16"	m	\$ 135,610	\$ 135,610	\$ 135,610	\$ 135,610	0%
7.20	Gaviones entrada y salida piedra 4"	m ³	\$ 91,136	\$ 101,036	\$ 91,136	\$ 101,036	11%
7.30	Tubería Perforada Alcantarillado 4"	m	\$ 19,924	\$ 19,924	\$ 19,924	\$ 19,924	2%
7.31	Tubería Perforada Alcantarillado 6"	m	\$ 30,275	\$ 30,275	\$ 30,275	\$ 30,275	1%
7.32	Tubería Perforada Alcantarillado 8"	m	\$ 41,145	\$ 41,145	\$ 41,145	\$ 41,145	1%
7.33	Tubería Perforada Alcantarillado 10"	m	\$ 63,330	\$ 63,330	\$ 63,330	\$ 63,330	0%
7.34	Tubería Perforada Alcantarillado 12"	m	\$ 93,158	\$ 93,158	\$ 93,158	\$ 93,158	0%
7.35	Tubería Perforada Alcantarillado 14"	m	\$ 110,947	\$ 110,947	\$ 110,947	\$ 110,947	0%
7.36	Tubería Perforada Alcantarillado 16"	m	\$ 139,179	\$ 139,179	\$ 139,179	\$ 139,179	0%
7.40	Obras de arte de interconexión 80x80	un	\$ 427,654	\$ 386,833	\$ 386,833	\$ 427,654	17%
8.0	Obras exteriores						
8.1	Cerramiento planta malla eslabonada	m	\$ 82,063	\$ 75,118	\$ 75,118	\$ 82,063	67%
8.2	Cunetas aguas lluvias	m	\$ 34,886	\$ 31,590	\$ 31,590	\$ 34,886	14%
8.3	Afirmado y compactado vías	m ²	\$ 51,398	\$ 56,905	\$ 51,398	\$ 56,905	66%
8.4	Empradización	m ²	\$ 2,566	\$ 2,566	\$ 2,566	\$ 2,566	0%
9.0	Conformación humedal						
9.1	Material de sustrato	m ³	\$ 7,478	\$ 7,478	\$ 7,478	\$ 7,478	0%
9.2	Vegetación	Un	\$ 1,183	\$ 1,183	\$ 1,183	\$ 1,183	0%
9.3	Grava 3/4 -1"	m ³	\$ 50,331	\$ 58,031	\$ 50,331	\$ 58,031	35%

Anexo 9. Análisis de precios unitarios Región Pacífica y porcentaje de variación

	Descripción	Unidad	APU Putumayo	APU Nariño	MIN	MAX	%
1.0	Preliminares						
1.1	Localización y Replanteo	m ²	\$ 1,636	\$ 1,832	\$ 1,636	\$ 1,832	12%
1.2	Campamento obra	Un	\$ 1,053,728	\$ 1,213,541	\$ 1,053,728	\$ 1,213,541	28%
2.0	Excavaciones						
2.1	Descapote y limpieza	m ³	\$ 14,533	\$ 15,400	\$ 14,533	\$ 15,400	25%
2.2	Excavaciones a mano	m ³	\$ 12,340	\$ 12,340	\$ 12,340	\$ 12,340	8%
2.3	Excavaciones a máquina	m ³	\$ 15,733	\$ 16,800	\$ 15,733	\$ 16,800	26%
3.0	Concretos						
3.1	Base concreto pobre e=0.05	m ³	\$ 227,035	\$ 222,309	\$ 222,309	\$ 227,035	27%
3.2	Concreto 3000 PSI impemeabilizado	m ³	\$ 362,158	\$ 377,870	\$ 362,158	\$ 377,870	21%
3.3	Concreto 3000 PSI	m ³	\$ 301,470	\$ 317,182	\$ 301,470	\$ 317,182	25%
3.4	Refuerzo acero 60000 PSI figurado	Ton	\$ 2,473,383	\$ 2,885,331	\$ 2,473,383	\$ 2,885,331	17%
4.0	Carpintería metálica						
4.1	Rejilla en acero a 36 Diam. 3/8" y separación de 1"	Ton	\$ 4,436,069	\$ 4,839,407	\$ 4,436,069	\$ 4,839,407	12%
5.0	Impermeabilización						
5.1	Compactación material existente	m ³	\$ 5,098	\$ 5,008	\$ 5,008	\$ 5,098	16%
5.2	Geomembrana	m ²	\$ 13,930	\$ 13,927	\$ 13,927	\$ 13,930	0%
6.0	Rellenos						
6.1	Conformación diques material en sitio	m ³	\$ 7,262	\$ 7,112	\$ 7,112	\$ 7,262	19%
7.0	Interconexión						
7.10	Tubería Alcantarillado 4"	m	\$ 16,256	\$ 16,355	\$ 16,256	\$ 16,355	2%
7.11	Tubería Alcantarillado 6"	m	\$ 26,607	\$ 26,706	\$ 26,607	\$ 26,706	1%
7.12	Tubería Alcantarillado 8"	m	\$ 37,478	\$ 37,576	\$ 37,478	\$ 37,576	1%
7.13	Tubería Alcantarillado 10"	m	\$ 59,662	\$ 59,761	\$ 59,662	\$ 59,761	1%
7.14	Tubería Alcantarillado 12"	m	\$ 89,491	\$ 89,589	\$ 89,491	\$ 89,589	0%
7.15	Tubería Alcantarillado 14"	m	\$ 107,280	\$ 107,378	\$ 107,280	\$ 107,378	0%
7.16	Tubería Alcantarillado 16"	m	\$ 135,511	\$ 135,610	\$ 135,511	\$ 135,610	0%
7.20	Gaviones entrada y salida piedra 4"	m ³	\$ 166,770	\$ 91,136	\$ 91,136	\$ 166,770	83%
7.30	Tubería Perforada Alcantarillado 4"	m	\$ 19,825	\$ 19,924	\$ 19,825	\$ 19,924	2%
7.31	Tubería Perforada Alcantarillado 6"	m	\$ 30,176	\$ 30,275	\$ 30,176	\$ 30,275	1%
7.32	Tubería Perforada Alcantarillado 8"	m	\$ 41,047	\$ 41,145	\$ 41,047	\$ 41,145	1%
7.33	Tubería Perforada Alcantarillado 10"	m	\$ 63,231	\$ 63,330	\$ 63,231	\$ 63,330	0%
7.34	Tubería Perforada Alcantarillado 12"	m	\$ 93,059	\$ 93,158	\$ 93,059	\$ 93,158	0%
7.35	Tubería Perforada Alcantarillado 14"	m	\$ 110,849	\$ 110,947	\$ 110,849	\$ 110,947	0%
7.36	Tubería Perforada Alcantarillado 16"	m	\$ 139,080	\$ 139,179	\$ 139,080	\$ 139,179	0%
7.40	Obras de arte de interconexión 80x80	un	\$ 376,886	\$ 427,654	\$ 376,886	\$ 427,654	16%
8.0	Obras exteriores						
8.1	Cerramiento planta malla eslabonada	m	\$ 67,975	\$ 82,063	\$ 67,975	\$ 82,063	48%
8.2	Cunetas aguas lluvias	m	\$ 33,938	\$ 34,886	\$ 33,938	\$ 34,886	12%
8.3	Afirmado y compactado vías	m ²	\$ 56,979	\$ 51,398	\$ 51,398	\$ 56,979	44%
8.4	Empradización	m ²	\$ 2,566	\$ 2,566	\$ 2,566	\$ 2,566	0%
9.0	Conformación humedal						
9.1	Material de sustrato	m ³	\$ 7,478	\$ 7,478	\$ 7,478	\$ 7,478	0%
9.2	Vegetación	Un	\$ 1,183	\$ 1,183	\$ 1,183	\$ 1,183	0%
9.3	Grava 3/4 -1"	m ³	\$ 78,931	\$ 50,331	\$ 50,331	\$ 78,931	72%

Anexo 10. Análisis de precios unitarios Región Amazonía y porcentaje de variación

Materiales aseo	
Escobas duras con cabo	\$ 3,000
Rastrillos	\$ 5,000
Bolsas basura	\$ 200
Cánecas (Juego P. ecológico 3 canecas)	\$ 450,000
Herramientas	
Palas	\$ 9,000
Baldes	\$ 2,000
Carreta	\$ 75,000
Martillo	\$ 15,000
Alicate	\$ 10,000
Guadaña	\$ 1,200,000
Machete	\$ 10,000
Tijera podadoras	\$ 30,000
Destornilladores	\$ 9,000
Hojas de segueta	\$ 2,100
Serrucho	\$ 12,000
Insumos	
Puntillas (lb)	\$ 1,200
Alambre (kg)	\$ 2,400
Gasolina (galones)	\$ 9,000
Abonos (kg)	\$ 1,900
Hervicidas (l)	\$ 12,000
Botiquín (un)	\$ 95,000
Candados (un)	\$ 24,000
Cinta señalización (rollo)	\$ 17,400
Actividades mantenimiento	
Dotacion (juego: guantes carnaza y caucho, impermeable, oberol, botas, linterna, monogafas)	\$ 179,700
Desenlode (costo extraccion y retiro x m ³)	\$ 20,000

Anexo 11. Resumen Cotización Materiales, herramientas e insumos O&M

Paquete ensayos A		Paquete ensayos B	
Ensayo	Precio	Ensayo	Precio
OD	\$ 25,000	OD	\$ 25,000
pH	\$ 9,500	pH	\$ 9,500
Acidez	\$ 8,400	Acidez	\$ 8,400
DBO ₅ (Soluble y total)	\$ 53,500	DBO ₅ (Soluble y total)	\$ 53,500
SS,SST, SSV	\$ 82,500	SS,SST, SSV	\$ 82,500
DQO (Soluble y total)	\$ 60,000	DQO (Soluble y total)	\$ 60,000
Nitrogeno total	\$ 48,000	Nitrogeno total	\$ 48,000
Fosforo total	\$ 39,000	Fosforo total	\$ 39,000
TOTAL	\$ 325,900	Cloruros	\$ 16,000
		Aceites y grasas	\$ 56,000
		Coliformes (Fecales y totales)	\$ 54,600
		Detergentes	\$ 53,700
		TOTAL	\$ 506,200

Anexo 12. Costo Paquetes de ensayos

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
TODOS	<2999	CP =	$176162826-(108824*DBO)+(9734*P)+(1025761*Q)$	0.7383
TODOS	Hasta max*	CI =	$-74160000+(3674*P)-(10570*Q)+(1909000*C)$	0.9801
TODOS	>3000	CP =	$195300000-(13710*DBO)+(93.48*P)+(323500*Q)$	0.9907
TODOS	max*	CI =	77126470	1.0000
CON DESINFECCIÓN				
TODOS	<2999	CP =	$193700000-(16790*DBO)-(1913*P)-(3234000*Q)$	0.8390
TODOS	>3000	CP =	$174194515+(64288*DBO)-(2657*P)+(3462616*Q)$	0.8048
TODOS	Hasta max*	CI =	$-141500000+(15490*P)-(2331000*Q)+(3898000*C)$	0.8670
TODOS	max*	CI =	77126470	1.0000

CP: Costo Personal (Por año)

CI: Costo Indirecto (Por año)

DBO: DBO₅ (mg/l)

Rango P: Rango Población

Q: Caudal (l/s)

C: Carga orgánica per capita (g/hab.d)

Hasta max*: La regresión se utiliza hasta que llega al costo máximo

max*: Costo máximo

Anexo 13. Regresiones Costos personal y Costos indirectos para todos los trenes de tratamiento

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
0	<2999	CMA =	$46310000-(1178*DBO)+(1195*P)+(12670*Q)$	0.9977
0	>3000	CMA =	$41382175.9-(495.5*DBO)+(1988.5*P)+(22665.9*Q)$	0.9757
CON DESINFECCIÓN				
0	<2999	CMA =	$67258587.9-(239.8*DBO)+(324.1*P)+(388133.6*Q)$	0.9958
0	>3000	CMA =	$67030000+(2601*DBO)+(336.1*P)+(354600*Q)$	0.9946

CMA: Costo Materiales y Actividades (Por año)

Anexo 14. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 0

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
1	<2999	CMA =	$49150000-(1588*DBO)+(1256*P)-(1333*Q)$	0.9973
1	>3000	CMA =	$45400000-(664.3*DBO)+(1772*P)+(25170*Q)$	0.9782
CON DESINFECCIÓN				
1	<2999	CMA =	$67370000-(34.33*DBO)+(15.71*P)+(538000*Q)$	0.9950
1	>3000	CMA =	$65490000+(8116*DBO)+(125.9*P)+(523500*Q)$	0.9952

Anexo 15. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 1

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
2	<2999	CMA =	$49220000-(1473*DBO)+(1240*P)+(7717*Q)$	0.9969
2	>3000	CMA =	$4545000-(449.6*DBO)+(1760*P)+(28310*Q)$	0.9780
CON DESINFECCIÓN				
2	<2999	CMA =	$66320000-(248.6*DBO)+(6.455*P)+(592700*Q)$	0.9939
2	>3000	CMA =	$63370000+(11670*DBO)+(13.16*P)+(594100*Q)$	0.9946

Anexo 16. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 2

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
3	<2999	CMA =	$48870000-(127.3*DBO)+(1002*P)+(79280*Q)$	0.9913
3	>3000	CMA =	$46120000-(2870*DBO)+(1778*P)+(22700*Q)$	0.9796
CON DESINFECCIÓN				
3	<2999	CMA =	$67820000-(236.8*DBO)+(274.9*P)+(393600*Q)$	0.9934
3	>3000	CMA =	$63550000+(14000*DBO)+(154.8*P)+(462600*Q)$	0.9955

Anexo 17. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 3

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
4	<2999	CMA =	$46490000-(1562*DBO)+(1258*P)+(5436*Q)$	0.9922
4	>3000	CMA =	$41649556.6-(818.1*DBO)+(1982.5*P)+(26311.2*Q)$	0.9757
CON DESINFECCIÓN				
4	<2999	CMA =	$67544801.3-(347.9*DBO)-(18.3*P)+(693424.3*Q)$	0.9940
4	>3000	CMA =	$65180000+(10560*DBO)-(59.88*P)+(676600*Q)$	0.9929

Anexo 18. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 4

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
5	<2999	CMA =	$46874244-(3616*DBO)+(1432*P)-(17447*Q)$	0.9150
5	>3000	CMA =	$41380496.1-(546.7*DBO)+(1999.2*P)+(24701.6*Q)$	0.9727
CON DESINFECCIÓN				
5	<2999	CMA =	$67530000-(358.3*DBO)+(93.65*P)+(582500*Q)$	0.9935
5	>3000	CMA =	$63430000+(14610*DBO)-(22.71*P)+(631900*Q)$	0.9936

Anexo 19. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 5

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
6 y 7	<2999	CMA =	$46230000-(476.9*DBO)+(1019*P)-(85280*Q)$	0.9880
6 y 7	>3000	CMA =	$42460000-(4206*DBO)+(1956*P)+(27170*Q)$	0.9764
CON DESINFECCIÓN				
6 y 7	<2999	CMA =	$67500000-(321.8*DBO)+(157.6*P)+(519300*Q)$	0.9941
6 y 7	>3000	CMA =	$62770000+(16010*DBO)+(18.24*P)+(589900*Q)$	0.9949

Anexo 20. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 6 y Tren 7

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
8	<2999	CMA =	$49290000-(2265*DBO)+(1337*P)-(33800*Q)$	0.9925
8	>3000	CMA =	$45210000-(595.8*DBO)+(1751*P)+(30800*Q)$	0.9794
CON DESINFECCIÓN				
8	<2999	CMA =	$67288862.3-(307.5*DBO)+(361.4*P)+(358698.3*Q)$	0.9958
8	>3000	CMA =	$66100000+(5109*DBO)+(326.1*P)+(357600*Q)$	0.9946

Anexo 21. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 8

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
9	<2999	CMA =	$46606357.1-(1884.8*DBO)+(1242.7*P)-(9623.4*Q)$	0.9938
9	>3000	CMA =	$41693085-(1195*DBO)+(1965*P)+(27560*Q)$	0.9753
CON DESINFECCIÓN				
9	<2999	CMA =	$67454584.1-(290.2*DBO)+(223.6*P)+(470195.2*Q)$	0.9945
9	>3000	CMA =	$64530000+(10780*DBO)+(146.4*P)+(494600*Q)$	0.9952

Anexo 22. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 9

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
10	<2999	CMA =	$46350000-(810.8*DBO)+(1094*P)+(28140*Q)$	0.9902
10	>3000	CMA =	$42776690.3-(4739.5*DBO)+(1948.6*P)+(2608.7*Q)$	0.9751
CON DESINFECCIÓN				
10	<2999	CMA =	$66770000-(1279*DBO)-(617*P)+(352800*Q)$	0.9913
10	>3000	CMA =	$63530000+(10780*DBO)+(146.4*P)+(494600*Q),0)$	0.9944

Anexo 23. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 10

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
11	<2999	CMA =	$4658000-(1861*DBO)+(1262*P)-(7248*Q)$	0.9897
11	>3000	CMA =	$41918162.3-(2364.1*DBO)+(1978.2*P)+(25275*Q)$	0.9752
CON DESINFECCIÓN				
11	<2999	CMA =	$67500000-(368.5*DBO)+(160.4*P)+(544900*Q)$	0.9944
11	>3000	CMA =	$64950000+(10160*DBO)+(86.28*P)+(558700*Q)$	0.9935

Anexo 24. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 11

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
12	<2999	CMA =	$46505515.1-(1878.5*DBO)+(999.7*P)+(70890.2*Q)$	0.9250
12	>3000	CMA =	$45040574.1-(10822.6*DBO)+(1944.3*P)+(12744.3*Q)$	0.9624
CON DESINFECCIÓN				
12	<2999	CMA =	$67500000-(413*DBO)+(245.6*P)+(451700*Q)$	0.9936
12	>3000	CMA =	$63520000+(13340*DBO)+(116.8*P)+(518700*Q)$	0.9941

Anexo 25. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 12

Tren	Rango P	FUNCIÓN	REGRESIÓN	r ²
SIN DESINFECCIÓN				
13 y 14	<2999	CMA =	$46250000-(911.5*DBO)+(1071*P)+(79400*Q)$	0.9683
13 y 14	>3000	CMA =	$44498644-(6621*DBO)+(1898*P)+(26196*Q)$	0.9644
CON DESINFECCIÓN				
13 y 14	<2999	CMA =	$67640000-(545.3*DBO)+(42.05*P)+(660800*Q)$	0.9930
13 y 14	>3000	CMA =	$60038351.3+(24412.7*DBO)-(195.8*P)+(793921.2*Q)$	0.9942

Anexo 26. Regresiones Costos Materiales y Actividades Tren 13 y Tren 14