

**SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA EL REÚSO DE AGUAS DE LAVADO,
DIRIGIDO A MICRO Y PEQUEÑAS EMPRESAS PRODUCTORAS DE
BEBIDAS**

LEONARDO MANZANO PAREDES

Trabajo de aplicación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Ambiental

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2013**

**SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA EL REÚSO DE AGUAS DE LAVADO,
DIRIGIDO A MICRO Y PEQUEÑAS EMPRESAS PRODUCTORAS DE BEBIDAS**

LEONARDO MANZANO PAREDES

Trabajo de aplicación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Ambiental

Directora:
DEBORA ALCIDA NABARLATZ
Ingeniera Química, Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2013**

DEDICATORIA

*A mi esposa, a mi hijo y mi hija,
a mi papá que me impulso a iniciar la maestría
y a mi mamá que me dio fuerzas para culminarla.*

AGRADECIMIENTOS

- A la Doctora *DEBORA NABARLATZ*, por la paciencia y la excelente labor profesional y personal, que realizo en la dirección de este proyecto.
- A la ingeniera *MAGDA LILIANA VALERO*, que compartió sus conocimientos de forma desinteresada y pudo ayudar a la culminación del proyecto.
- A la **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**, al Director de la maestría en Ingeniería Ambiental, el Doctor *HUMBERTO ESCALANTE*, el fue un apoyo importante y una guía para el desarrollo del proyecto con mucha dedicación y compromiso con los estudiantes del postgrado.
- Al gerente de **BODEGAS DEL CAÑIZAL**, *JUAN PABLO CAÑIZARES PALLARES*, por el aporte de la información, y la confianza que me brindo para la ejecución de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	18
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.....	20
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN.....	21
1.2.1 Lavado de Envases.....	21
1.2.2 Enjuague de Envases.....	23
1.2.3 Preparación y Envasado del Producto.....	24
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	25
2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES... ..	26
2.1 REÚSO DE AGUA.....	29
2.1.1 Aguas Grises.....	29
2.1.2 Regulación y Parámetros para el Agua.....	30
2.1.2.1 Lavado de Envases.....	33
2.1.2.2 Enjuague Final de los Envases.....	34
2.1.3 Sistemas de Tratamiento de Aguas Grises.....	34
2.1.3.1 Sistema de Tratamiento Simple.....	35
2.1.3.2 Sistema Físico Filtración por Arena.....	36
2.1.3.3 Sistema Físico - Filtración de Membrana.....	37
2.1.3.3.1 Microfiltración.....	37
2.1.3.3.2 Ultrafiltración.....	37
2.1.3.4 Sistemas Electro-químicos - Electrocoagulación.....	38
2.1.3.5 Sistemas Biológicos.....	38
2.1.3.5.1 Filtro percolador.....	38
2.1.3.5.2 Lodos Activos.....	39
2.1.3.7 Desinfección por Ultravioleta.....	39
2.1.3.8 Desinfección con Ozono.....	40
2.1.4 Sistemas Comerciales de Tratamiento de Aguas Grises.....	40

2.2	MÉTODO DE SELECCIÓN MULTICRITERIO.....	42
2.2.1	Método PROMETHEE.....	44
3.	METODOLOGÍA.....	48
3.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	48
3.2	INVENTARIO DE PUNTOS DE VERTIMIENTOS Y CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA.....	48
3.3	ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA REÚSO DEL AGUA.....	49
3.4	CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LA DECISIÓN FINAL.....	49
3.5	EVALUACIÓN ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN LA EMPRESA.....	50
3.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..	50
4.	RESULTADOS.....	51
4.1	BALANCE GLOBAL DE AGUA DE LA EMPRESA.....	51
4.1.1	Consumo de Agua en Producto.....	52
4.1.2	Lavado de Envases.....	53
4.1.3	Enjuague de Envases.....	53
4.1.4	Lavado de Áreas de Producción.....	55
4.1.5	Uso de Batería de Baños.....	55
4.1.6	Consolidado de los Consumos de Agua.....	56
4.1.7	Caracterización de Aguas de Lavado.....	57
4.2	PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE DESECHO.....	59
4.2.1	Corriente 1: Lavado de Envases.....	60
4.2.1.1	Solución 1: Filtro Percolador, Filtro de Arena, Sedimentador y Ozono..	61
4.2.1.1.1	Filtro Percolador Matala, Marca Aqua2use.....	61
4.2.1.1.2	Filtro de Arena.....	63
4.2.1.1.3	Filtro Atrapa Sedimento.....	64
4.2.1.1.4	Desinfección con Ozono.....	65
4.2.1.1.5	Calculo consumo de la solución 1 por m ³	65
4.2.1.2	Solución 2: Filtro percolador, Electrocoagulación, Sedimentador y UV.	66
4.2.1.2.1	Filtro Percolador Matala, Marca Aqua2use.....	67

4.2.1.2.2	Electrocoagulación.....	67
4.2.1.2.3	Filtro Atrapa Sedimento.....	69
4.2.1.2.4	Desinfección por Ultravioleta (UV).....	69
4.2.1.2.4	Cálculo consumo de la solución 2 por m ³	69
4.2.1.3	Solución 3: Filtro Percolador, de Partículas, Microfiltración, Adsorción con Carbón Activado y Desinfección UV.....	71
4.2.1.3.1	Filtro Percolador Matala, Marca Aqua2use.....	72
4.2.1.3.1	Filtro de Partículas.....	72
4.2.1.3.2	Microfiltración y Adsorción con Carbón Activado.....	73
4.2.1.3.3	Desinfección por Ultravioleta (UV).....	74
4.2.1.3.4	Calculo consumo de la solución 3 por m ³	75
4.2.1.4	Solución 4: Sistema Aqua2use GWTS 1200.....	76
4.2.2	Corriente 2: Enjuague de Envases.....	78
4.3	SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA ADECUADA (PROMETHEE).....	79
4.3.1	Resultados del Software Visula PROMETHEE.....	85
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	90
4.4	ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO.....	92
4.4.1	Lavado de Envases Corriente 1.....	92
4.4.2	Enjuague de Envases Corriente 2.....	93
5.	CONCLUSIONES.....	95
6.	RECOMENDACIONES.....	96
	BIBLIOGRAFÍA.....	97
	ANEXOS.....	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Procesos de tratamiento de aguas residuales.....	26
Tabla 2. Componentes principales y propiedades físicas de las aguas residuales.	27
Tabla 3. Caracterización de aguas de desecho y aguas grises.....	30
Tabla 4. Caracterización de aguas grises.....	31
Tabla 5. Estándares internacionales para el reúso del agua.....	32
Tabla 6. Calidad del agua recomendada por Pepsico para el lavado de botellas.	33
Tabla 7. Distribución de artículos que han utilizado el método PROMETHEE por áreas de aplicación.....	43
Tabla 8. Estimación de consumo de agua en el enjuague de envases.....	53
Tabla 9. Cálculo de consumo de agua en el enjuague de envases.....	54
Tabla 10. Consolidado de consumos de agua de mayo a julio, dividió por actividades.....	56
Tabla 11. Datos del consumo de agua del AMB año 2012.....	57
Tabla 12. Resultados de la caracterización de las aguas de lavado de envases (primera etapa) en Bodegas del Cañizal.....	58
Tabla 13. Caracterización de aguas grises de la empresa piloto e intervalos normales.....	59
Tabla 14. Caracterización de aguas grises evaluadas por el fabricante Aqua2use.	62
Tabla 15. Comparación porcentaje de remoción de filtro de arena por diferentes autores.....	63
Tabla 16. Comparación porcentaje de remoción por electrocoagulación.....	68
Tabla 17. Comparación porcentaje de remoción microfiltración.....	75
Tabla 18. Comparación porcentaje de remoción con Aqua2use GWTS 1200.....	78

Tabla 19. Resumen corriente 2 “Enjuague de Envases”	80
Tabla 20. Resumen solución 1 “Filtro Percolador, Filtro de Arena, Sedimentador y Ozono”	82
Tabla 21. Resumen solución 2 “Filtro percolador, Electrocoagulación, Sedimentador y UV”	83
Tabla 22. Resumen solución 3 “Filtro Percolador, de Partículas, Microfiltración, Adsorción con Carbón Activado y Desinfección UV”	84
Tabla 23. Resumen solución 4 “Sistema Aqua2use GWTS 1200”	85
Tabla 24. Matriz de evaluación de los equipos seleccionados para compararse..	85
Tabla 25. Flujo de preferencias.....	89
Tabla 26. Red GAIA.....	90
Tabla 27. Resumen de gastos anuales de insumos corriente 1.....	93
Tabla 28. Resumen de gastos anuales en insumos corriente 2.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación botellas de vidrio retornables.....	22
Figura 2. Diagrama de proceso de lavado y enjuague de botellas.....	24
Figura 3. Diagrama de proceso productivo de la empresa Bodegas del Cañizal..	25
Figura 4. Plano de la planta de producción (primer piso) con sus diferentes puntos de uso de agua.....	54
Figura 5. Plano de la planta de producción (segundo piso) con sus diferentes puntos de agua.....	55
Figura 6. Esquema solución 1, filtro percolador, filtro de arena, sedimentador y ozono.....	61
Figura 7. Filtro de malla Aqua2use UG GWDD.....	62
Figura 8. Curvas de presión para filtros Rusco.....	64
Figura 9. Esquema Solución 2: Filtro percolador, Electrocoagulación, Sedimentador y UV.....	67
Figura 10. Esquema Solución 3: Filtro percolador, de Partículas, Microfiltración, Adsorción con carbón activado y Desinfección UV.....	71
Figura 11. Filtro RUSCO, tamaño de poro y contaminantes que retiene.....	72
Figura 12. Filtro plisado Hydronix, porcentaje de eficiencia y caída de presión....	73
Figura 13. Curvas y datos de prestación de bomba GT20 Irrigaror.....	74
Figura 14. Esquema tratamiento con Aqua2use GWTS 1200.....	77
Figura 15. Equipo para tratamiento de aguas grises Aqua2use GWTS 1200.....	77
Figura 16. Diagrama esquemático tratamiento de primera corriente de enjuague.	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Registros de consumos de agua del 2012 en la facturación del AMB..	51
Gráfico 2. Producción de licores de los meses de mayo, junio y julio de 2012 (tamaños de envases de 375, 750, 1500, 1750 y 2000 L).....	52
Gráfico 3. Distribución de pesos de los criterios de selección.....	81
Gráfico 4. Clasificación PROMETHEE I.....	87
Gráfico 5. Clasificación de alternativas con herramienta “Walking Weights”.....	88
Gráfico 6. Diagrama computado de Phi.....	89

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	104
ANEXO B	112
ANEXO C	115

NOTACIÓN Y LISTADO DE ABREVIATURAS

Acueducto Metropolitano de Bucaramanga	AMB
Armstrong	Å
Carbono Orgánico Total	COT
Coliformes Fecales	CF
Coliformes Totales	CT
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO
Demanda Química de Oxígeno	DQO
Dólares americanos	US\$
Empresa Pública de Alcantarillado de Santander	EMPAS
Environmental Protection Agency	EPA
Galones por minuto	GPM
Global Water Intelligence	GW
Graphical Analysis for Interactive Aid	GAIA
Hertzio	Hz
Horas	h
Horse Power	HP
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales	IDEAM
libra-fuerza por pulgada cuadrada	PSI
Litro	L
Metro	m
Micro, Pequeña y Mediana Empresas	MIPYME
Micrómetro	µm
Mililitros	mL
Millones de metros cúbicos	Mm ³
Minuto	min
Nephelometric Turbidity Units	NTU
Organización Mundial de la Salud	OMS
Pesos colombianos	COP
Preference Ranking Organisation Methods for Enrichment Evaluations	PROMETHEE
Sólidos Suspendidos	SS
Sólidos totales	ST
<i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i>	S.M.
Ultravioleta	UV
Vatio	W
Voltio	V

RESUMEN

TÍTULO: SELECCIÓN DE UNA TECNOLOGÍA PARA EL REÚSO DE AGUAS DE LAVADO, DIRIGIDO A MICRO Y PEQUEÑAS EMPRESAS PRODUCTORAS DE BEBIDAS*

AUTOR: Leonardo Manzano Paredes**

PALABRAS CLAVE: Agua gris, agua de lavado, reúso, microempresa, filtro de arena, microfiltración, electrocoagulación, tratamiento agua, multicriterio, PROMETHEE.

DESCRIPCIÓN: En este proyecto de investigación, dirigido a buscar soluciones de tratamiento de aguas de desecho para pequeñas empresas, se busca encontrar una alternativa económicamente viable para tratar las aguas generadas en el proceso de lavado de envases. Usando como referencia una empresa productora de licores, la que brindó datos históricos de consumos de agua para la elaboración de su abanico de productos, entre los meses de mayo y julio de 2012. Se evaluaron los puntos de consumo de agua en la empresa y se realizó un análisis de las aguas de lavado que se producen, a partir de estos datos se propusieron cinco alternativas de tratamiento para las corrientes generadas en las etapas de lavado y enjuague de botellas. Para seleccionar la alternativa más adecuada, teniendo en cuenta que debía ser una selección objetiva, se usó una metodología de selección multicriterio llamada PROMETHEE GAIA y el software Visual PROMETHEE. La solución, resultado de la evaluación de las alternativas es un tratamiento de corrientes separadas de lavado y enjuague, empleando una mezcla de tecnologías de cribado, filtración y desinfección que brinda un tratamiento efectivo a las aguas de desecho y evita el consumo de 45% de agua potable, para reintroducirla al proceso y ahorrar cerca de 300 m³ anuales, reduciendo las descargas de la empresa al alcantarillado público y haciendo más eficiente y responsable el consumo de agua tratada del acueducto.

*Trabajo de posgrado en Maestría en Ingeniería Ambiental

**Facultad de Ingenierías Físico-Química. Escuela de Ingeniería Química.
Directora: Dra. Debora Alcida Nabarlatz

ABSTRACT

TITLE: SELECTING A TECHNOLOGY FOR WASHING WATER REUSE, AIMED TO MICRO AND SMALL ENTERPRISES FOR BEVERAGE PRODUCTION *

AUTHOR: Leonardo Manzano Paredes**

KEYWORDS: Grey water, wash water, reuse, microenterprise, sand filter, microfiltration, electrocoagulation water treatment, multicriterio analyses, PROMETHEE

CONTENT: In this research project, aimed at finding solutions for wastewater treatment for small businesses, is looking to find an economically viable alternative for wastewater generated in the bottle washing process. Using as a reference a manufacturer of liqueur, this one provided historical data of water consumption for the production of its product range, between May and July 2012. Were evaluated the water consumption points in the company and it was made the analysis of the wash waters produced, from these data, are proposed five treatment alternatives for the currents generated in the stages of washing and rinsing of bottles. To select the most appropriate, considering that it should be an objective selection, we used a multi-selection methodology called PROMETHEE GAIA and Visual PROMETHEE software. The solution resulting from the evaluation of alternatives is a separate streams treating in wash and rinse, using a mixture of technologies which include screening, filtration and disinfection which provides an effective treatment of wastewater, and avoids the consumption of 45% of drinking water, to reintroduce the process and save about 300 m³ per year, reducing discharges to the public sewer company and making more efficient and responsible consumption of treated water from the water supply company.

* Masters Degree Paper in Environmental Engineering

** Physical-Chemical Engineering Faculty, Chemical Engineering School.

Supervisor: PhD. Debora Alcida Nabarlatz

INTRODUCCIÓN

El 31 de octubre de 2011, la población mundial alcanzó los 7000 millones de personas. Según las Naciones Unidas, en el año 2025 la población mundial sobrepasará los 8300 millones de personas. Actualmente, una de cada 10 personas vive en una ciudad, pero dentro de solamente 35 años vivirán en ciudades dos de cada tres personas [1]. Esta coyuntura que mezcla gran cantidad de población y alta concentración en ciudades, aumenta la presión sobre los recursos naturales ejercida por la especie humana, siendo el agua un recurso gravemente afectado por esta realidad. La contaminación de ríos y lagos, así como la excesiva demanda del recurso agua que las ciudades ejercen sobre el ecosistema conllevan al denominado "estrés del agua", indicador de que no hay suficiente agua en calidad y cantidad para satisfacer las necesidades humanas y medioambientales.

Los impactos sociales, económicos y ambientales de una perspectiva futura de inevitable escasez de agua, están impulsando el cambio hacia un nuevo paradigma en la gestión de los recursos hídricos. Con este panorama en mente, se hace claro que existe una urgente necesidad de poner freno al uso indiscriminado del agua, promoviendo enfoques que incorporen los principios de sostenibilidad, ética ambiental y la participación pública en el desarrollo de proyectos. En la actualidad, es común la preocupación por los problemas ambientales en los sectores gubernamentales, académicos y de la sociedad en general. El sector industrial no es ajeno a esto y en el caso del agua, la práctica del reúso es muy conocida pero no está muy extendida. Las aguas residuales tratadas, constituyen actualmente un recurso valioso y su demanda aumentará en la medida que decrece la disponibilidad del agua potable y se incrementa su precio.

En este proyecto se pretende acercar la microempresa a la práctica del reúso de agua, utilizando una combinación de tecnologías de tratamiento, con una perspectiva de tratamiento descentralizado de los efluentes, convirtiendo el reúso en una estrategia de control de la contaminación de los cuerpos hídricos, así como en una oportunidad para minimizar los costos de consumo de agua tratada, haciendo más eficiente la gestión de los recursos de la empresa.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Históricamente, la gestión de los recursos hídricos se ha centrado en el suministro de agua para las actividades humanas, con una suposición intrínseca de que las soluciones tecnológicas podrían seguir el ritmo de las demandas de agua en constante aumento y los requisitos cada vez más estrictos de calidad del agua [2]. Debido a los impactos sociales, económicos y ambientales de los desarrollos del pasado, y a la perspectiva de una posible escasez de agua, se hace necesaria la intervención del estado, la industria y el público en general para remediar este problema. Es por esto que un nuevo paradigma para el desarrollo y la gestión de los recursos hídricos está evolucionando, con base en los principios de sostenibilidad y ética ambiental.

La preocupación por los problemas ambientales y la contaminación se centra generalmente en las grandes empresas, ya que se tiene la perspectiva de que desprenden gran cantidad de desechos contaminantes al entorno natural. Esto tiene más relevancia en los países altamente desarrollados, en donde esta industria es muy importante y su contribución al deterioro ambiental es muy significativa, pero no se debe despreciar al sector de las micro, pequeñas y medianas empresas, que en casos como el colombiano, tienen gran impacto.

Las MIPYMES (Micro, Pequeña y Mediana Empresas) en Colombia representan el 96.4% de los establecimientos, aproximadamente el 63% del empleo y el 45% de la producción manufacturera [3]. El impacto de las MIPYMES infringido al ambiente, se debe mayormente al uso de tecnología tradicional y de maquinaria obsoleta, baja productividad, reducido o nulo tratamiento de los desechos generados y especialmente gran número de empresas generadoras de pequeñas cantidades de residuos no tratados y vertidos directamente al aire, agua y suelo. Para minimizar el impacto ambiental producido por el sector industrial, se usan dispositivos de control de emisiones que mitigan la cantidad de desechos contaminantes emitidos por la empresa, pero se debe tener en cuenta que estos dispositivos están normalmente dirigidos y desarrollados hacia el sector de la gran empresa. En el caso de las pequeñas empresas industriales, la oferta de tecnologías para el control de emisiones es muy reducida debido a las limitaciones de presupuesto y dificultades para acceder a financiación. Por esta razón, es importante realizar investigaciones que lleven a soluciones a la medida para las MIPYMES, que promuevan la implementación de soluciones ambientales desde el

punto de generación, a un costo razonable, y así evitar el tratamiento centralizado de los efluentes vertidos por este sector económico.

Perspectivas ambientales de escasez de agua en calidad y cantidad suficiente, hacen que se vea una tendencia de aumento del precio para su consumo. Las tarifas de agua a escala mundial aumentaron en promedio 6.8% entre julio de 2010 y julio de 2011 a tipos de cambio constantes. Una encuesta realizada en el año 2011 por la GWI's (Global Water Intelligence), muestra que el precio promedio de agua combinada (precio del agua de consumo y de desecho para tratamiento) de las 308 principales ciudades, es de US\$2.03/m³ [4]. En Bucaramanga el precio del agua combinada, del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP (AMB) y la Empresa Pública de Alcantarillado de Santander S.A. ESP. (EMPAS) es de alrededor de US\$1.15/m³ (COP \$2,214) [5], muy por debajo del promedio mundial. En el caso de uso de agua comercial, que es el valor que paga la empresa evaluada, al costo residencial se le suma el 50% (“aporte solidario”) por lo que se pagan US\$1.72/m³ (COP \$3,321)[5].

Teniendo en cuenta estos antecedentes, la presente investigación pretende encontrar una solución para el reúso del agua en pequeñas empresas productoras de bebidas usando como empresa piloto a “Bodegas del Cañizal”. Se espera que la solución de reúso del agua sea compacta, económicamente viable y a su vez, pueda implementarse en empresas con características semejantes de vertimiento de aguas, aplicando un método equivalente al de este estudio. La empresa piloto Bodegas del Cañizal tiene un alto consumo de agua del AMB, debido a los procesos de lavado de envases, producción de la bebida y usos generales. Debido a esto, se busca encontrar un tratamiento descentralizado de los vertimientos, con la ventaja que representa el manejo de los flujos pequeños, locales y separados, de los efluentes generados por la empresa que requieran tratamiento técnico. Este enfoque tiene máxima eficiencia, aunque se requiere una mayor inversión en equipamiento e infraestructura, que conllevan a una mayor complejidad del sistema.

1.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

La empresa “Bodegas del Cañizal” se encuentra situada en la ciudad de Bucaramanga, barrio Girardot en la calle 20 N°13-27. El propósito de la empresa es ofrecer bebidas espirituosas (con diferentes porcentajes de alcohol) dirigidas principalmente a los consumidores de estrato uno y dos. Actualmente, la empresa

fabrica diez productos (aperitivos de aguardiente, de ron, vinos de manzana, uva, vinos espumosos, etc.) que son distribuidos en Santander y Norte de Santander (Colombia), con una producción anual promedio de 160000L de bebidas alcohólicas. Para llevar a cabo esta producción, cuenta con una bodega de 370m², 10 empleados y los siguientes equipos básicos: un reactor de 2000L, un sistema de microfiltración para agua, un filtro prensa, una llenadora para 12 botellas, y el respectivo sistema de tapado, etiquetado y bodegaje. Además, realizan la actividad de lavado previo de las botellas utilizadas para la producción (ver Figuras 2 y 3).

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

1.2.1 Lavado de Envases

El proceso productivo inicia con el acopio y posterior lavado de los envases que se van a emplear. Sin importar que los envases sean nuevos (primer uso), o usados (segundo uso), todo envase debe lavarse con detergente y agua potable (*Decreto 365 de 1994*), antes de su envasado. La única excepción a esta regla es si hay un bloqueo mecánico o algún tipo de tecnología aprobada o reconocida que elimine la necesidad del enjuague de las botellas antes de usarlas.

Según el manual de calidad **PEPSICO** (empresa de bebidas refrescantes que habitualmente usa envases retornables), los tipos de envases a lavar se ubican en tres grupos (*ver figura 1*):

- **Grupo 1:** Abarca botellas cuyo interior está húmedo o seco, y que contienen suciedad en la base y hasta la cuarta parte inferior de las paredes. Los tipos de suciedad incluyen restos de bebida, suciedad del ambiente, y colonias de moho. Estos envases son los más fáciles de lavar.
- **Grupo 2:** Abarca botellas cuyo interior está seco, y que contienen suciedad en el cuello y hombro de la botella. En este caso, la limpieza es más difícil que en el Grupo 1. Los tipos de suciedad típicos del grupo anterior también pueden presentarse en el Grupo 2. Especialmente difíciles de eliminar son las pequeñas colonias de moho que se forman en el cuello de la botella.

- **Grupo 3:** Abarca los tipos de suciedad que se adhieren a la botella, y pueden identificarse fácilmente por su naturaleza. Éstos son arcilla, suciedad muy intensa, moho intenso, pintura, óxido, cemento y yeso. Los envases de este grupo se consideran “imposibles de limpiar” y son más difíciles de lavar que los grupos anteriores. Los tipos de suciedad del Grupo 1 y Grupo 2 también pueden encontrarse en el Grupo 3 [6].

Figura 1. Clasificación botellas de vidrio retornables.



Fuente: PEPSICO. (de izquierda a derecha se ven los envases sucios de los grupos uno, dos y tres).

La práctica de lavado de envases retornables (de segundo uso) se ha venido realizando desde hace largo tiempo en las empresas de bebidas refrescantes. En Colombia, los envases reusados o retornables son descritos por el Ministerio de Salud y Protección Social, en el Decreto Número-1686 de 2012 como: “Envase que tiene unas características de resistencia y sanidad tales que puede ser llenado y utilizado varias veces y que se somete a un proceso de lavado, enjuague y desinfección, antes de cada uso”. Un caso especial es la industria de bebidas de Singapur, la cual es alentada por el gobierno para reusar botellas, y donde cerca del 85% de todas las botellas vendidas son devueltas para su reuso [7].

Aunque en las empresas de bebidas refrescantes es normal la recepción de envases con alto grado de contaminación, éste no es el caso de la empresa

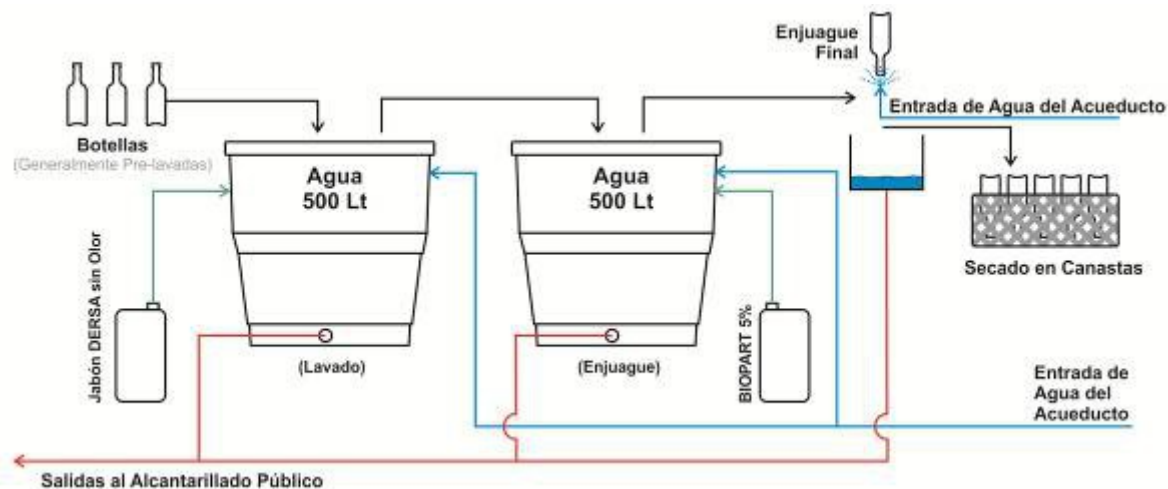
Bodegas del Cañizal, ya que existe una empresa intermedia que realiza la labor de recolección y lavado previo. En la empresa piloto, los envases se reciben prelavados (empresas independientes dedicadas a esta actividad suministran los envases) o limpios con etiquetas. De todos modos, los envases recibidos prelavados son lavados nuevamente a través de un proceso de lavado en dos etapas. El químico principal empleado para la limpieza de las botellas en la primera etapa del lavado es un surfactante (250g de detergente en polvo DERSA sin olor). Este se mezcla en un tanque de 500L con aproximadamente 260L de agua (esto depende del tamaño y cantidad de envases). El propósito de esta primera etapa de lavado es la de saponificar las grasas, hidrolizar proteínas, solubilizar carbohidratos, desinfectar, disminuir la tensión superficial del líquido y facilitar la humectación de las superficies para la remoción/suspensión de sedimentos y/o desestabilización de espuma. Los surfactantes mejoran la penetración del material cáustico en la suciedad, controlan la formación de espuma, facilitan la remoción de etiquetas, y ayudan al drenaje y enjuague de las botellas.

La segunda etapa del lavado consiste en sumergir las botellas en una solución de TQ BIOPAR, el cual es un amonio cuaternario de quinta generación (180mL) en un tanque de 500L con aproximadamente 260L de agua (ver Figura 2). El compuesto TQ BIOPAR empleado tiene una concentración al 35%, tiene un amplio espectro microbicida, es no tóxico, no irritante y no corrosivo. Es efectivo en presencia de materia orgánica y en amplios rangos de pH y en todo tipo de aguas sin perder su alta solubilidad; su función es eliminar la actividad biológica y prevenir el crecimiento de bacterias, hongos y virus.

1.2.2 Enjuague de Envases

El enjuague de los envases ya lavados, consiste en retirar los químicos remanentes del proceso de lavado usando una válvula tipo jet que usa agua potable a presión, teniendo los envases invertidos (se colocan "boca abajo") en posición de drenaje, sobre el orificio de agua del enjuague. A continuación se ubican en canastas para su secado (ver Figura 2). Los envases regresan a la posición normal (boca arriba) justo antes de entrar a la llenadora.

Figura 2. Diagrama de proceso de lavado y enjuague de botellas.



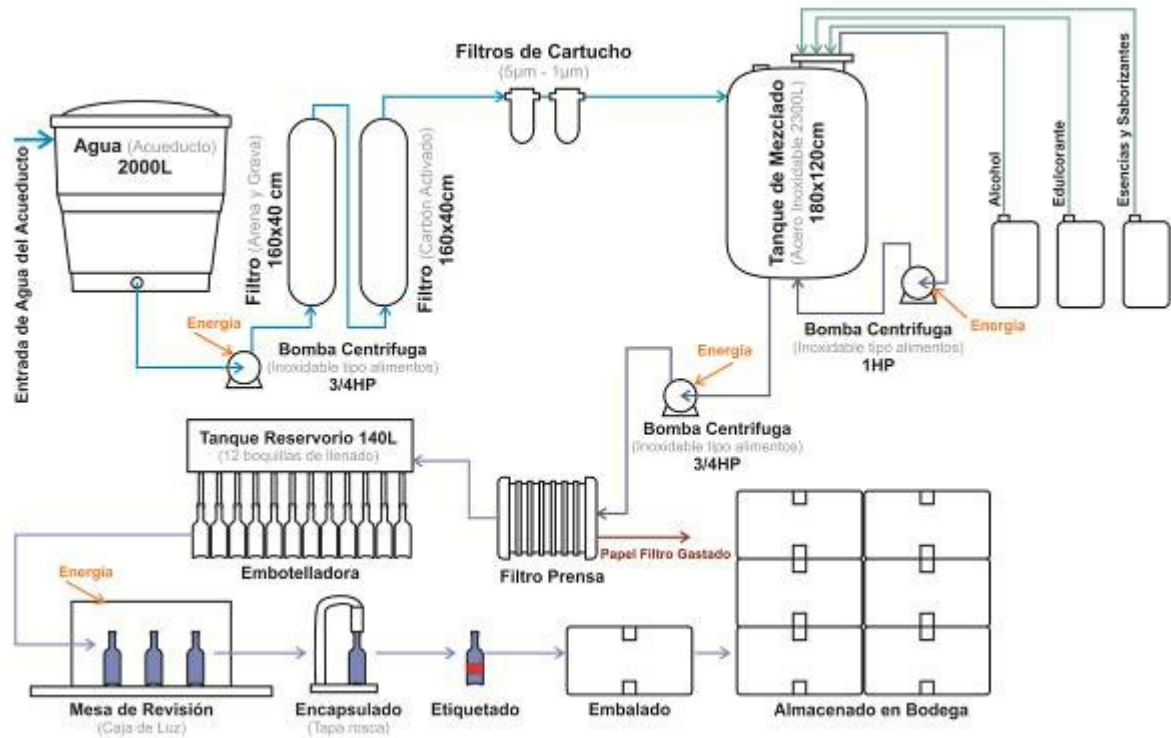
1.2.3 Preparación y Envasado del Producto

La materia prima básica para la preparación de las bebidas alcohólicas de la empresa es el agua, para lo cual se cuenta con un tanque reservorio de agua potable de 2000L para su uso en los lotes de producción. Las características fisicoquímicas del agua para producción deben ser adecuadas, ya que tiene efectos sensoriales y sobre la vida de anaquel de los productos. Los contaminantes en el suministro de agua representan una amenaza al sabor, aroma y apariencia de la bebida. Por esta razón, toda el agua empleada para la preparación del producto terminado debe ser previamente tratada. Una ventaja evidente de los sistemas de tratamiento de agua, es que ofrecen protección contra los problemas de calidad de agua que pueden presentarse en la planta de tratamiento municipal (AMB), o a través del sistema de distribución de la planta.

El sistema de tratamiento de agua utilizado en la empresa consiste en un filtro de arena y grava, un filtro de carbón activado y dos filtros de membrana de 1 μ m y 5 μ m. Una vez se tiene el agua con la calidad necesaria, se vierte en el tanque de mezcla, al cual luego se adicionan el alcohol, los endulzantes y colorantes dependiendo del producto que se esté preparando. Desde el tanque de mezclado, se hace pasar el producto terminado (usando una bomba centrífuga de grado alimenticio), a través de un filtro prensa que sirve para retener posibles contaminantes, para llegar finalmente al tanque de embotellado. Posteriormente, las botellas son llenadas en la embotelladora de 12 boquillas, y el producto embotellado pasa a la mesa de revisión en donde se verifica que no se encuentren

materiales extraños o contaminantes en las botellas antes de ser encapsuladas y etiquetadas. Finalmente el producto se embala en cajas y se almacena para despacho (Ver figura 3).

Figura 3. Diagrama de proceso productivo de la empresa Bodegas del Cañizal.



2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Según la valoración de demanda de agua del IDEAM, se estima que para el normal desarrollo de las actividades industriales en el año 2008 en Colombia se consumieron 1543 millones de m^3 (Mm^3) de agua. En este mismo año, el consumo de agua de la pequeña industria fue de $111Mm^3/año$, mientras que el de la gran industria en el país fue de $86Mm^3/año$. En estos datos se ve una significativa diferencia que muestra que el consumo de la pequeña industria es superior al de la gran industria. Sólo en Santander en el año 2007 la pequeña industria consumió $7.93Mm^3$ [8], lo que convierte a este sector en uno de gran relevancia en cuanto al gasto del recurso agua. Además, posee el agravante de que este sector está constituido por unidades de vivienda que albergan establecimientos industriales, cuyos vertimientos de aguas de desecho pasan directamente a las redes de alcantarillado municipales sin tratamiento.

Dependiendo del tipo de industria y de la infraestructura presente, la composición de las aguas residuales industriales puede variar enormemente. En la empresa de referencia para este proyecto la actividad principal es el envasado de bebidas, y los efluentes más importantes son las aguas de lavado, ya sea de envases, equipos o de la planta productiva. Para el tratamiento de aguas residuales de lavado se han empleado diferentes tecnologías, su selección depende de las características del efluente, de la calidad final requerida, de los costos y la facilidad de producción.

2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales se pueden dividir en dos grandes áreas, las tecnologías convencionales, y las emergentes. El tratamiento convencional de aguas residuales consta de las siguientes etapas: pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario o de desinfección. En la Tabla 1 se puede ver un resumen de las tecnologías empleadas en las diferentes etapas del tratamiento de aguas de desecho.

Tabla 1. *Procesos de tratamiento de aguas residuales.*

	PRELIMINAR	PRIMARIO	SECUNDARIO	TERCIARIO O AVANZADO
Propósito	Eliminación de sólidos grandes y partículas granuladas	Remoción de sólidos suspendidos	Tratamiento biológico y remoción de los contaminantes orgánicos biodegradables más comunes	Remoción de contaminantes específicos tales como nitrógeno, fósforo, color, olor, etc.
Ejemplo de tecnología	Colado, asentamiento, filtro de arena	Filtrado, sedimentación	Percolación, lodos activados, tratamiento anaeróbico, estanques de estabilización de desechos (estanques de oxidación)	Biorreactor de membrana, ósmosis inversa, tratamiento por ozono, coagulación química, carbón activado.

Fuente: adaptado de "Water and Wastewater Reuse" [2]

Tabla 2. Componentes principales y propiedades físicas de las aguas residuales.

Parámetro	Descripción del componente
Sólidos suspendidos	Incluye tanto la materia en suspensión así como sustancias coloidales. Por lo general están compuestos de limo y arcilla, microorganismos y partículas de materia orgánica. Los sólidos en suspensión pueden provocar el desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias, y, si el agua es inadecuadamente tratada, puede afectar la eficacia de la desinfección.
Sólidos disueltos totales	Los sólidos disueltos totales se componen de materia disuelta orgánica e inorgánica. El contenido total de sólidos disueltos puede afectar a la idoneidad del agua regenerada para aplicaciones tales como la reutilización industrial, riego agrícola y recarga de aguas subterráneas.
Materia orgánica	Incluye tanto material como partículas en suspensión. Compuesto principalmente de proteínas, carbohidratos y grasas. La materia orgánica biodegradable se mide con mayor frecuencia en términos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO). Los compuestos orgánicos seleccionados sobre la base conocida o sospechada de su carácter canceroso, muta-génico, teratología o toxicidad aguda, a menudo se identifican como contaminantes prioritarios. Los compuestos orgánicos que tienden a resistirse a los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales son a menudo clasificados como orgánicos refractarios. Ejemplos típicos incluyen tensioactivos, fenoles, y pesticidas agrícolas. La estabilización inadecuada de la materia orgánica puede conducir al desarrollo de condiciones sépticas y malos olores.
Materia inorgánica	Constituyentes inorgánicos tales como calcio, sodio y sulfato se añaden a las fuentes domésticas de agua como resultado de su uso. Los metales pesados se suelen añadir a las aguas residuales por las actividades comerciales e industriales. Los compuestos inorgánicos seleccionados sobre la base conocida o sospechada de su carácter canceroso, mutagénico, teratología o toxicidad aguda alta a menudo se identifican como contaminantes prioritarios. Componentes inorgánicos específicos puede afectar en gran medida los usos a los que el agua regenerada se va a aplicar.
Patógenos	Las clases principales de organismos patógenos son bacterias, protozoos, helmintos y virus.
Nutrientes	Los nutrientes principales son el nitrógeno y el fósforo en diversas formas. Otros componentes inorgánicos son también nutrientes. Cuando se descargan a cuerpos de agua, los nutrientes pueden estimular el crecimiento de la vida acuática indeseable. Cuando se aplican a la tierra, especialmente para la recarga de acuíferos, las cantidades excesivas puede provocar la contaminación de las aguas subterráneas.

Trazas constituyentes	Componentes que se encuentran en concentraciones muy bajas, incluyendo los pesticidas, productos farmacéuticos, agentes hormonalmente activos y productos de cuidado personal residuales. Algunos metales son a menudo identificados como los oligoelementos. Los componentes traza pueden presentar problemas de salud si son consumidos.
Propiedades físicas	
Turbidez	Las partículas suspendidas en el agua que dispersan la luz pueden ser cuantificadas como la turbidez. La turbidez se utiliza a menudo como sustituto de un parámetro para evaluar el desempeño del proceso y la idoneidad para su reutilización.
Color	El color puede ser utilizado para evaluar la edad o el estado de las aguas residuales sin tratar
Olor	Es el resultado de la conversión biológica de los componentes orgánicos e inorgánicos. Los compuestos olorosos también pueden ser descargados en los sistemas de recolección.
Temperatura	Una medida de qué tan calientes o frías son las aguas residuales. La temperatura afecta la tasa de actividad biológica en los sistemas de tratamiento.
Transmitancia	Una medida de la cantidad de luz, expresado como un porcentaje, que pasa a través de una solución. Los constituyentes disueltos y coloidales en el agua absorben la luz y reducen la transmisión general, lo cual puede afectar al rendimiento de los procesos de desinfección con UV.
Conductividad	Es una medida de la concentración de elementos químicos disueltos.

Fuente: "Water and Wastewater Reuse" (Traducción libre) [2]

Los tratamientos preliminares y primarios son generalmente procedimientos físicos, tales como las rejillas que eliminan restos sólidos grandes, y la sedimentación de material particulado. Un tratamiento secundario puede utilizar procesos biológicos, tales como estanques de estabilización, filtro percolador, zanja de oxidación, y lodos activados, seguidos por la sedimentación de la biomasa. El tratamiento terciario o avanzado es un tratamiento adicional para mayor nivel de eliminación de contaminantes específicos, tales como nitrógeno o fósforo, que no pueden ser eliminados por tratamientos convencionales secundarios, así como tecnologías para la desinfección de las aguas residuales. Las tecnologías emergentes son generalmente tratamientos secundarios o terciarios como oxidación química, procesos avanzados de oxidación, membranas, reactores biológicos de membranas, etc. Todos estos tratamientos son muy eficientes para eliminar la materia orgánica y los contaminantes más complejos.

Los procesos de tratamiento de aguas residuales se pueden categorizar en tres partes.

- **Procesos Físicos:** Los contaminantes se eliminan físicamente con mallas, sedimentación, filtración, flotación, adsorción, centrifugación, etc.
- **Procesos Químicos:** Los contaminantes se eliminan químicamente con coagulación, absorción, oxidación-reducción, resinas de intercambio iónico, etc.
- **Procesos Biológicos:** La contaminación se elimina usando mecanismos biológicos tales como tratamientos aeróbicos, anaeróbicos y procesos fotosintéticos.

Como ejemplo, las instalaciones municipales de tratamiento de aguas residuales utilizan combinaciones de tecnologías de procesos físicos, tratamientos biológicos y químicos.

2.1 REÚSO DE AGUA

El reúso de agua residual no es nuevo, existen documentos del Consejo de Salud del Estado de California de 1906 que hablan del uso de agua de desecho para irrigación [2]. Existen una amplia variedad de tecnologías que pueden emplearse para los diferentes tipos de aguas contaminadas, pero en nuestro caso particular, lo que se busca es encontrar tecnologías de pequeña escala que se ajusten a las necesidades de la empresa. A partir de los datos de caracterización de las aguas de desecho producidas por la empresa, se encuentra que las características del agua efluente son equivalentes a las de las aguas grises, por lo que las tecnologías de tratamiento de aguas grises pueden aplicarse al problema de aguas de lavado de la empresa.

2.1.1 Aguas Grises

Las aguas grises son aguas residuales residenciales sin tratar, de las cuales se excluye el agua de los retretes y en la mayoría de los casos, del lavavajillas. Las Aguas Grises sí incluyen las aguas residuales de bañeras, duchas, lavabos de baño y lavadoras de ropa. Dependiendo del uso final que se les va a dar a estas aguas, pueden requerir o no de tratamientos intensivos [9]. Un uso típico para las aguas grises es la descarga de retretes [10–13], debido a que el agua que emplean no requiere agua potable. Las tecnologías de tratamiento de aguas grises están

principalmente enfocadas a pequeña escala, desde el tratamiento del agua de un lavamanos, el tratamiento de aguas de una casa [11], hasta soluciones a gran escala como reciclaje de agua del domo del milenio con 6 millones de visitantes [14]. Teniendo esta posibilidad de escalabilidad de las soluciones, las tecnologías de tratamiento de aguas grises son una excelente aproximación a la solución requerida por la empresa. En las tablas 3 y 4 se ve la caracterización tipo de estos efluentes.

Tabla 3. Caracterización de aguas de desecho y aguas grises.

Parámetro	Agua de desecho doméstica	Agua gris
pH	5.9–7.7	5-10.9
Sólidos totales mg/L	200–1200	113–2410
Sólidos totales disueltos (STD) mg/L	100–850	137–1260
Sólidos Suspendidos (SS) mg/L	24–608	3.1–330
DBO5 mg/L	28–400	33–1460
Carbono Orgánico Total (COT) mg/L	42–290	30–880
DQO mg/L	45–1000	3.8–1380
Nitrógeno, mg total N/L	20–117	0.28–74
Fosforo, Mg total P/L	3.2–30	0.0062–74
Calcio mg Ca/L	1.1–200	3.6–200

Fuente: adaptado de “Fouling in greywater recycling by direct ultrafiltration”. [15]

2.1.2 Regulación y Parámetros para el Agua

La empresa de licores, Bodegas del Cañizal, genera vertimientos de aguas de lavados cuyas características físico químicas, son equivalentes a las de las aguas grises. Estos vertimientos pueden ser reusados para introducirlos nuevamente al proceso productivo o en las tareas generales de la empresa. Usando tecnologías de reúso de aguas grises se puede llegar a encontrar una solución económicamente viable que permita la reinyección de estas aguas de desecho para su uso nuevamente.

Tabla 4. Caracterización de aguas grises.

Referencia	DBO5 (mg/L)	SS (mg/L)	pH	CE μS/cm	CF CFU/100 mL
(Jeppesen 1996) - Brisbane GW	90-120	45-330	6.6-8.7	325- 1140	-
(Christova – Boal et al. 1995) - Bathroom GW - Laundry GW	45-330 10-520	43-380 26-400	6.4-8.1 6.3-9.5	82-250 83-880	-
(Water CASA 2000) - Arizona GW	-	-	-	-	20- 7,640000
(Jeppesen 1996) Guidelines for Irrigation of Plants	NA	NA	5.0-8.0	0-5000	NA

Fuente: "Graywater Reuse in Other Countries and its Applicability to Jordan." [16]

La mayor preocupación para la reutilización de agua de desecho está asociada a su calidad. Las características de las aguas grises reportadas en múltiples estudios indican que pueden considerarse como aguas residuales diluidas. A pesar del hecho de que las aguas grises contiene sólo una cantidad mínima de contaminación fecal, se han encontrado estudios que indican que en ocasiones pueden tener altos indicadores fecales. En algunos estudios de aguas grises, el número de indicadores fecales reportados estaban en el mismo rango que los que se encuentra en las aguas residuales crudas. Con el fin de hacer un sistema de reutilización de aguas grises práctico y aceptable, es necesario un tratamiento antes de su reutilización, siendo las principales preocupaciones la turbidez, concentración microbiana, y la posible presencia de patógenos. Hay diferentes tratamientos disponibles incluyendo el almacenamiento, la aireación, sedimentación, filtración, tratamiento biológico, y la desinfección [17].

La ley 373 de 1997, en su artículo 5º, establece el reúso obligatorio del agua, pero no reglamenta los casos o tipos de proyecto que deben implementar esta ley. Actualmente en Colombia se encuentra en proyecto la reglamentación para el reúso del agua, por el CINARA (Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico). Por este motivo no se tienen parámetros que cumplir para el agua para reúso, pero en general, los países que tienen una normatividad sobre el reúso de las aguas residuales han tomado como referencia lo establecido por la Agencia Estadounidense de Protección Ambiental (US EPA, por sus siglas en inglés).

Tabla 5. Estándares internacionales para el reúso del agua.

	Aplicación	DBO ₅ *	SST*	Turbiedad d**	Coliformes Fecales~
China (Ernst et al., 2005)	Vaciado de retretes	<10	<1500	<5	3
		<20	<1000	<20	3
	Riego de pasto	<10	<1000	<5	3
	Propósito lavado				
Japan (Tajima, 2005)	Vaciado de retretes	-	-	<2	-
	Paisajismo	-	-	<2	-
	Recreación	-	-	<2	-
Taiwan (Lin et al., 2005)	Vaciado de retretes	10	-	-	-
Israel (Gross et al., 2006)	Agua para reúso	10	10	-	<1
Germany (Nolde, 1999)	Agua para reúso	<5	-	-	<1000
Spain, Canary Islands (USEPA, 2004)	Agua para reúso	10	3	-	-
Canada, British Columbia (CMHC, 2004)	Reúso urbano	10	5	-	2.2
Costa Rica (Dallas et al., 2004)	Riego de comida	<40	-	-	<1000
	Reúso urbano	<40	-	-	<100
US EPA (USEPA, 2004)	Agua para reúso	-	-	-	14 por muestra
USA, Washington (USEPA, 2004)	Reúso sin restricción	30	30	2 prom 5 max	2.2 prom 23 max
Australia, Queensland (2003)	Reutilización de aguas grises para el riego de jardines en una zona sin alcantarillado	20	30	-	100

*: mg.L⁻¹, **: NTU, ~: CFU.100mL⁻¹, -: no aplicable, prom: Promedio, max: máximo.

Fuente: adaptado de "Hybrid membrane processes for water reuse" [19]

La US EPA (US Environmental Protection Agency) clasificó el reúso en ocho categorías, de acuerdo con la calidad del agua: urbano, áreas de acceso restringido, agrícola para cultivos consumidos crudos y para cultivos no

consumidos crudos, recreacional, industrial, recarga de acuíferos y reúso indirecto potable. Para usos urbanos, cultivos de productos que se consumen crudos y recreación, la concentración de DBO y SST no debe sobrepasar los 10mg/L. Para otros usos, en donde el contacto no generaría un peligro inminente para el ser humano como, por ejemplo, en la industria, usos ambientales y en construcción, la normatividad no es tan severa, y su utilización se podría dar si tiene una concentración por debajo de 30mg/L de DBO y SST.

Como se ve en la tabla 5 el estándar que debe cumplir el agua tratada depende del uso final que esta tenga. Por ejemplo, si el uso final es la descarga de retretes, la US EPA indica que el pH debe estar entre 5.8 y 8.6, el olor debe ser normal, el color transparente, E-coli no debe ser detectado, el DBO <20mg/L y el DQO <30mg/L [18]. En la tabla 5 se puede ver las especificaciones de aguas para reúso y su aplicación posible en diferentes países.

2.1.2.1 Lavado de Envases

El agua para el lavado de envases puede verse afectada por las impurezas del agua; aunque existe una gran variedad de sales minerales o ácidos presentes en las aguas naturales, son pocos los constituyentes presentes en cantidades significativas para generar problemas importantes. Las siguientes especies, pueden ser objetables para el agua de lavado de botellas.

Tabla 6. Calidad del agua recomendada por Pepsico para el lavado de botellas.

Resumen calidad del agua	
Componentes	Límite superior
Dureza Total	400 ppm (como CaCO ₃)
Alcalinidad "M"	Índice Ryznar 6.2- 6.8*
Sulfato	200 ppm
Cloruro	250 ppm
Sílice	100 ppm
Cloro	0.5 ppm Cl ₂ libre

Fuente: "Manual de Calidad PEPSICO" [6]

- **Dureza Total:** Limita acción del detergente; sarro o incrustaciones en el equipo, manchas en las botellas.
- **Sólidos Totales:** Aumento de corrosión, decoloración; espumeo, derrames en la llenadora.
- **pH:** Afecta al desinfectante, enjuague excesivo, altera el agua de desecho.
- **Alcalinidad:** Afecta el pH, forma sarro o incrustaciones, daña la botella.

2.1.2.2 Enjuague Final de los Envases

El enjuague final se debe realizar con agua limpia, de buena calidad bacteriológica, debe cumplir con los requisitos de agua potable (previstos por las normas locales y por las normas establecidas por la O.M.S.) y debe dar negativo para coliformes. El agua de lavado puede contener cloro que no supere 1 ppm, ni debe presentar defectos físicos, debe estar libre incluso de cantidades mínimas de materia coloidal o partículas, a fin de reducir al máximo el potencial de espumeo [6].

2.1.3 Sistemas de Tratamiento de Aguas Grises

Las tecnologías aplicadas para el tratamiento de aguas grises incluyen sistemas físicos, químicos y biológicos, La mayoría de estas tecnologías inician con una etapa de separación sólido-líquido como tratamiento primario, seguido por una etapa de desinfección como tratamiento final. Para evitar la obstrucción de los tratamientos siguientes, se aplica un tratamiento primario como fosas sépticas, filtros de bolsa, coladores y otros tipos de filtros para reducir la cantidad de partículas, aceites y grasas presentes. La etapa de desinfección se utiliza para cumplir los requisitos microbiológicos [20]. La mayoría de las tecnologías de tratamiento de aguas grises que se encuentran en la literatura, están divididas en las siguientes cinco categorías.

- a) Simples (filtrado grueso y desinfección)
- b) Físicos (filtro de arena, adsorción y membrana)
- c) Químicos (foto-catalíticos, electrocoagulación y coagulación)
- d) Biológicos (filtro aireado biológico, contacto biológico rotatorio y bioreactor de membrana)
- e) Extensivos (construcción de humedales)

Estos sistemas están conformados por una etapa de pre tratamiento como el filtrado o sedimentación y una etapa de desinfección [21]. En cuanto a los usos finales para las aguas grises tratadas que se encuentran en literatura [21], los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Vaciado de retretes	54%
Irrigación y regado de jardines	36%
Uso exterior y limpieza	5%
Lavado	2.5%
Infiltración	2.5%

En Estados Unidos el uso para el agua residual tratada depende de variables como el clima, la regulación y el tipo de industria, pero la aplicación más conocida de estas aguas está en la irrigación de campos de golf y espacios de recreación [18]. Otras aplicaciones tradicionales son:

- Irrigación agrícola.
- Recarga de acuíferos.
- Tanques reservorios de protección contra incendios.
- Torres de enfriamiento.

A continuación se muestra un resumen de las tecnologías evaluadas en este estudio para el tratamiento de las aguas de desecho de la empresa.

2.1.3.1 Sistema de Tratamiento Simple

Los tratamientos de aguas grises simples constan de dos etapas como son el desbaste o filtrado grueso con sedimentación para remover los sólidos grandes y, a continuación, una etapa de desinfección. El desbaste o filtrado grueso es una operación en donde se eliminan los sólidos de mayor tamaño presentes habitualmente en las aguas a tratar, para evitar daños o baja eficiencia en los procesos posteriores del tratamiento. Es una operación preliminar, donde usualmente se emplea una rejilla de barras metálicas, manual o auto-limpiante, a través de la cual circula el agua.

Utilizando este tratamiento simple constituido sólo por filtrado grueso y tanque de sedimentación, en la regulación australiana es aceptado como agua para irrigación. Para ilustrar la efectividad de esta tecnología simple de tratamiento de

aguas grises, Stephenson reporta que en la literatura se encuentran remociones estándar de 49 a 70% de DQO [21].

2.1.3.2 Sistema Físico Filtración por Arena

La filtración se consigue haciendo circular el agua verticalmente y en descenso a través de un lecho de arena de entre 0.15 y 0.3 mm por simple gravedad, teniendo lugar una filtración lenta. La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión (la arena se puede usar acompañada de antracita o se puede usar tierra de diatomeas). El mecanismo de la separación de sólidos es una combinación de asentamiento, retención, adhesión y atracción, por lo que se eliminan partículas mucho menores que el espacio intersticial. Es un sistema muy utilizado para el tratamiento de agua potable [22].

El tamaño ideal efectivo de la arena debe ser lo suficientemente pequeño como para garantizar un buen flujo de salida de agua con buena calidad, así como evitar la penetración de material incrustante a tal profundidad que no pueda ser retirado por raspado de la superficie. Esto es, por lo general en el rango de 0.15 a 0.35 mm y se determina experimentalmente. Es posible combinar dos o más tipos de arena para llegar al tamaño efectivo de la mezcla que esté cerca del ideal.

Las características deseables para todos los filtros son las siguientes:

- buenas características hidráulicas (permeable);
- no reactivo con las sustancias en el agua (inerte y fácil de limpiar);
- resistente y duradero;
- libre de impurezas, e
- insoluble en agua.

La grava usada para soportar el filtro debe tener las mismas características [23]. Existen diferentes combinaciones para el filtrado por arena, además de tecnologías de filtración rápida que mejoran la cantidad de efluente y minimizan los tiempos de proceso.

2.1.3.3 Sistema Físico - Filtración de Membrana

Las membranas son barreras físicas semipermeables que separan dos fases, impidiendo su contacto y restringiendo el movimiento de las moléculas a través de ella de forma selectiva. Permiten la separación física de la mezcla agua y las sustancias contaminantes, generando un efluente acuoso depurado. Las membranas tienen capacidad para proporcionar elevados flujos de permeado, son compactas, baratas y fácilmente intercambiables [22].

2.1.3.3.1 Microfiltración

Para garantizar la ausencia de material en suspensión se usan membranas que actúan como tamices que atrapan toda sustancia que sea mayor que el tamaño de los poros y deja pasar el fluido sin partículas. La microfiltración utiliza valores de diferencia de presión transmembranaria comprendidos en el intervalo 100 - 500kPa, pudiendo separar tamaños de partículas dentro del rango: 0.1 μ m – 10 μ m de distinta naturaleza: sólidos suspendidos, partículas finas y algunos coloides. En diferentes estudios, las membranas de microfiltración han demostrado que son confiables para producir agua con turbidez menor a 0.1 NTU (Nephelometric Turbidity Units), teniendo una eficiencia de remoción promedio de 99.46% para las partículas en el tamaño del intervalo de 3 - 15 micras y 91.3% para las bacterias heterotróficas [24].

Una aplicación emergente para la microfiltración es el tratamiento de aguas residuales, en particular en las aguas residuales municipales. Membranas capilares que operan con carcasas de alimentación lateral a velocidades muy bajas de flujo cruzado, han reportado una excelente claridad y esterilidad cuando se realizan con retrolavado frecuente. Cuando se utiliza en conjunto con biorreactores de alta velocidad, generalmente con bajos tiempos de retención se obtiene una excelente eliminación de partículas incluyendo bacterias y virus [25].

2.1.3.3.2 Ultrafiltración

Se puede utilizar como pre-tratamiento de agua superficial, agua de mar, y efluentes biológicamente tratados, antes de ingresar a los sistemas de desmineralización por membranas, tales como ósmosis inversa y nanofiltración. La

ultrafiltración utiliza diferencias de presión transmembranaria de 100 - 800kPa, con un intervalo de tamaño de poro de 10Å – 1000Å. Es la barrera más eficiente para eliminar sólidos en suspensión, bacterias, virus, endotoxinas y otros patógenos para la producción de agua de alta pureza. La eliminación de virus por ultrafiltración es significativamente mejor que la eliminación por microfiltración, debido fundamentalmente al menor tamaño de poro de estas membranas [24].

2.1.3.4 Sistemas Electro-químicos - Electrocoagulación

La electrocoagulación es un tratamiento empleado en aguas residuales mediante el cual diversos contaminantes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero sin el uso de coagulantes químicos como el sulfato de aluminio, cuya función es desestabilizar la suspensión coloidal aportando carga eléctrica contraria a la del coloide. En el caso de la técnica de electrocoagulación, ésta desestabiliza la suspensión haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua y provocando reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo. Dicha corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz necesaria, provocando una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Los iones metálicos aportados por los electrodos son liberados en el medio acuoso formando óxidos metálicos que atraen eléctricamente los contaminantes que son desestabilizados [26].

2.1.3.5 Sistemas Biológicos

2.1.3.5.1 Filtro percolador

También denominados filtros biológicos o lechos bacterianos. Son los sistemas aerobios de biomasa inmovilizada más extendidos en la industria. Suelen ser lechos fijos de gran diámetro, rellenos con rocas o piezas de plástico o cerámica con formas especiales para desarrollar una gran superficie de contacto. Sobre la superficie crece una fina capa de biomasa, sobre la que se dispersa el agua residual a tratar, que moja en su descenso la superficie. Al mismo tiempo, ha de quedar espacio suficiente para que circule aire, que asciende de forma natural. El crecimiento de la biomasa provoca que parte de los microorganismos se desprendan de la superficie, y por lo tanto, seguirá siendo necesaria una sedimentación posterior para su separación del efluente. En general, también se

realiza una recirculación de parte del efluente limpio, una vez producida la separación.

2.1.3.5.2 Lodos Activos

Consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en una balsa aireada, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, donde la materia orgánica es degradada por las bacterias presentes. Junto con el proceso de degradación, y para separar los flóculos del agua, se ha de llevar a cabo una sedimentación, donde se realiza una recirculación de parte de los fangos, para mantener una elevada concentración de microorganismos en el interior del reactor, además de una purga equivalente a la cantidad crecida de organismos [22].

2.1.3.7 Desinfección por Ultravioleta

La luz ultravioleta puede categorizarse como UV-A, UV-B, UV-C, con longitudes de onda de alrededor de 40 a 400nm. La luz ultravioleta efectiva para inactivar microorganismos es la UV-B y la UV-C, en los rangos del espectro electromagnético de 200-310nm, con máxima efectividad alrededor de los 265nm. La radiación UV se utiliza para dañar la estructura genética de las bacterias, virus, y otros patógenos, haciéndolos incapaces de la reproducción. En este proceso se absorbe luz por parte de un catalizador o sustrato y ocurren tanto reacciones de oxidación como de reducción, por lo que no sólo se puede aplicar la fotocátalisis en compuestos orgánicos, sino también a la reducción de iones inorgánicos y a la reducción de otros compuestos orgánicos. La desventaja de la desinfección UV es la necesidad del mantenimiento y reemplazo frecuentes de las lámparas, además de la necesidad de un efluente altamente tratado para asegurarse de que los microorganismos no encuentren partículas que los protejan [24].

La efectividad de la muerte de microorganismos depende de la intensidad de la luz y del tiempo de contacto. Cualquier condición que disminuya estos parámetros disminuirá la efectividad del método de desinfección. El caudal afecta el tiempo de contacto ya que a mayor caudal menor tiempo de contacto. Las características de los efluentes que más afectan el desempeño de desinfección con UV son la transmisión de luz UV y la cantidad de sólidos en suspensión o turbiedad. Para una mejor desinfección el contenido de SS debe ser menor a 10 a 15mg/L y la turbiedad menor que 5 o 10NTU.

La eficiencia de un reactor de luz ultravioleta depende de:

- Transmisión o absorbancia de UV
- Concentración de sólidos en suspensión
- Caudal hidráulico
- Concentración de hierro o dureza
- Fuente del efluente
- Requerimientos de desinfección
- Vida de la lámpara
- Diseño de equipo
- Crecimiento biológico en la superficie del reactor

2.1.3.8 Desinfección con Ozono

Para eliminar cualquier patógeno remanente después de las etapas previas de tratamiento, se inyecta ozono para oxidar toda la materia orgánica remanente. El ozono es una molécula muy inestable que tiende a descomponerse en una secuencia de reacciones que generan radicales entre los que se encuentra el radical hidroxilo. La oxidación de la materia orgánica sucede de dos formas: la directa que representa la reacción entre la molécula orgánica y el ozono disuelto; y la indirecta, mediante la cual los radicales hidroxilos actúan como oxidantes. Las desventajas de la implementación de esta tecnología radican en el coste de la producción del ozono, ya que requiere de entre 22 y 33kWh/kg O₃. Además, en medios con aniones carbonato y bicarbonato, se neutralizan los radicales ya que reaccionan con los hidroxilos del medio para formar radicales carbonato o bicarbonato que no intervienen en reacciones de mineralización de materia orgánica [24]. La ventaja radica en que en el mercado existe una gran variedad de generadores a precios bajos, además de la comprobada eficiencia para eliminar los patógenos del agua adicionando 40ppm de ozono para lograr una buena desinfección [27].

2.1.4 Sistemas Comerciales de Tratamiento de Aguas Grises

Se han desarrollado múltiples tratamientos empaquetados para aguas grises, de los cuales a continuación se presentan algunos que son comercializados en Norte América, Europa, y Australia.

- **AQUS® System**, por WaterSaver Technologies, es una de las soluciones más pequeñas y compactas del mercado. El principio básico es recolectar agua del lavamanos para usarla, después de filtrada, en el retrete. Usado por dos personas en el hogar, puede reducir el consumo de agua de 38 a 75L diarios, aproximadamente 19000L por año. El equipo tiene un costo aproximado de US\$ 300.
- **Brac Greywater Recycling System**, es un diseño canadiense para uso residencial. Ahorra una tercera parte del agua consumida por una familia típica de cuatro personas (el agua es usada para descarga de retretes), y el costo varía dependiendo del tamaño entre US\$2,000 y US\$3,000.
- **ReWater® system**, captura, filtra y reusa aguas provenientes del jacuzzi, duchas, baños y lavarropas. Está formado por un tanque colector y un filtro de arena (equivalente a los usados para filtrar piscinas). El fabricante garantiza el sistema por 10 años.
- **Aqua2use**, es un sistema que usa concepto de flujo de pistón de múltiples cámaras con cuatro filtros para atrapar grandes cantidades de impurezas sin obstruir el sistema. De acuerdo con documentos de la empresa este sistema se puede instalar sobre el suelo, medio sumergido en el suelo o bajo tierra, para mayor comodidad. Se reutilizan aguas grises tratadas para céspedes y jardines. El costo del sistema es de US\$770. También ofrece el sistema de tratamiento de aguas grises **WL55**, que utiliza las aguas grises para los inodoros. Se compone de un filtro de agua, un tanque de 55 galones de almacenamiento, y un sistema de desinfección UV y peróxido de hidrógeno. Este dispositivo cuesta US\$3,000.
- **Ecoplay**, es una solución europea de gestión de agua que recoge y limpia agua de baños y duchas, por lo que se puede reutilizar para bajar el retrete.
- **GreyBoss Greywater Diverter System**, es un sistema de tratamiento de aguas para riego de jardines, vendido en Australia. Una vez que el agua es capturada, es llevada directamente en el suelo. El sistema cuesta US\$2,100.

Ninguno de estos sistemas produce calidades finales de agua potable, son sólo tratamientos para usos de calidad básica como riego de jardines y uso en depósitos de retretes para su descarga.

2.2 MÉTODO DE SELECCIÓN MULTICRITERIO

En el momento en el que se inicia un proyecto, se inicia la toma de decisiones, las cuales son fundamentales para el buen desarrollo de las actividades proyectadas. Cuando se comparan dos o más alternativas, en algunos casos es posible discriminar cuál presenta ventajas evidentes, por lo que en este escenario es fácil tomar la decisión acertada. Pero existen momentos en los que no hay una alternativa claramente mejor que otra o que múltiples alternativas cumplen satisfactoriamente un mismo fin. Los métodos de evaluación y decisión multicriterio buscan la selección entre un conjunto de alternativas factibles, la optimización con varias funciones objetivo simultáneas, un agente de decisión, y procedimientos de evaluación racionales y consistentes. Son una sofisticada herramienta matemática que facilita la comparabilidad en decisiones complejas que requieren un análisis multidimensional, frecuentemente empleando distintas escalas de medición, y un conocimiento del problema afectado por cierto grado de incertidumbre [28].

Para poder evaluar y tomar decisiones con respecto a las tecnologías más adecuadas que se requieren para dar solución al problema de reúso de aguas de lavado, se emplea un método de evaluación y decisión multicriterio que permite la selección objetiva entre un conjunto de alternativas factibles, y evidencia los diferentes criterios de selección para tomar la decisión final del diseño, integrando y ponderando variables heterogéneas que incluyen aspectos económicos, técnicos, ambientales, institucionales, sociales, etc.

Dentro de los métodos de relaciones de superación, el método PROMETHEE-GAIA, es ampliamente usado como herramienta de ayuda a la decisión multicriterio y se seleccionó como método para el presente trabajo debido a la amplia bibliografía existente, con más de 450 publicaciones [29], y a su aplicación en el ámbito ambiental. En este sentido, en el Anexo 1 podemos ver 90 artículos referenciados que emplean el método PROMETHEE en el área ambiental. El nombre PROMETHEE viene de “*Preference Ranking Organisation Methods for Enrichment Evaluations*” y GAIA de “*Graphical Analysis for Interactive Aid*”. El método PROMETHEE I y II fue inicialmente desarrollado por el profesor Jean-Pierre Brans en 1982. El software empleado es el Visual PROMETHEE 1.2, basado en PROMETHEE VI.

Tabla 7. Distribución de artículos que han utilizado el método PROMETHEE por áreas de aplicación.

Área de Aplicación	Número	Porcentaje (%)
Gestión Medioambiental	47	24.1
Gestión financiera y de negocios	25	12.8
Administración de agua e hidrología	28	14.4
Química	24	12.3
Logística y transporte	19	9.7
Administración energética	17	8.7
Producción manufacturera y de ensamble	19	9.7
Social	7	3.6
Otros	9	4.6
Total	197	100

Fuente: "PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications" [30]

El software Visual PROMETHEE es una herramienta utilizada como método de selección multicriterio, y está diseñado para ayudar a:

- Evaluar muchas soluciones posibles de acuerdo con múltiples criterios conflictivos entre sí.
- Identificar la mejor decisión posible.
- Clasificar por importancia las posibles decisiones de mejor a peor.
- Visualizar decisiones o evaluar problemas para entender mejor las dificultades de obtener buenas decisiones.
- Lograr decisiones consensuadas cuando muchas decisiones deben tomarse con puntos de vista conflictivos.
- Justificar o invalidar decisiones basadas en elementos objetivos.

La estructura de preferencias de PROMETHEE está basada en comparaciones de pares de opciones, evaluadas en los diferentes criterios. Para la evaluación de las alternativas con el software Visual PROMETHEE se deben tener en cuenta la siguiente terminología básica.

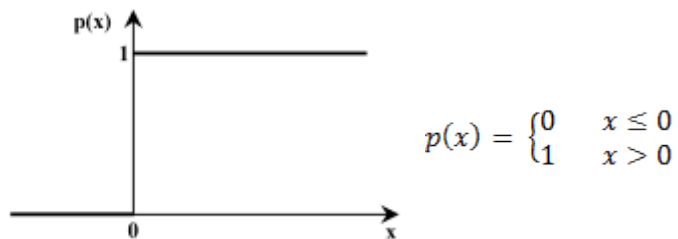
- **Acción:** El término se usa para designar ya sea una posible decisión o un artículo a evaluar, Visual PROMETHEE compara las diferentes acciones que se evalúan en los diferentes criterios. Son sinónimos: alternativa, decisión, artículo.

- **Restricción:** son usadas en el proceso de selección múltiple de PROMETHEE V. Son ecuaciones lineales o desigualdades que PROMETHEE V debe cumplir de acuerdo con los requisitos de la toma de decisiones.
- **Criterio:** es un atributo asociado a cada acción que hace que sea posible la comparación de las acciones y para determinar las mejores. Puede ser cuantitativo (un número está asociado a cada acción, tales como el precio de un artículo) o cualitativos (en este caso, una escala cualitativa debe definirse con un número de niveles ordenados, tales como por ejemplo: muy malo, malo, promedio, bueno, muy bueno).
- **Peso:** es un número positivo que representa la importancia relativa del criterio.

2.2.1 Método PROMETHEE

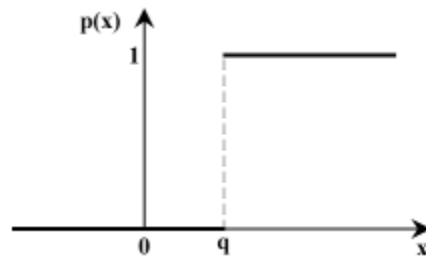
El método PROMETHEE, trata de establecer un orden jerárquico en un conjunto de alternativas, mediante la evaluación en función de k criterios, f_1, f_2, \dots, f_k . El criterio f_j se le asocia a un criterio generalizado $p_j(x)$ (Criterio de Preferencia) el cual valora la preferencia de una alternativa a respecto de una alternativa b en función de la diferencia entre las evaluaciones, $f_j(a) - f_j(b)$. Los criterios de preferencia $p_j(x)$ se describen a continuación:

a) **Criterio de Preferencia Tipo I:** Función de preferencia usual



En este caso la indiferencia entre a y b sólo se produce cuando $f(a) - f(b) \leq 0$. Si existe una diferencia positiva, el valor de la función criterio de preferencia será uno y, el tomador de decisiones tendrá una preferencia estricta por la alternativa. En esta función no se define ningún parámetro extra y sólo permite al tomador de decisiones usar el criterio de forma usual cuando éste lo requiera.

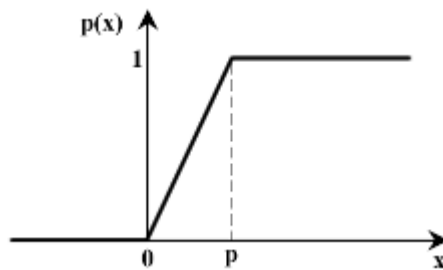
b) **Criterio de Preferencia Tipo II:** Función de preferencia en forma de U



$$p(x) = \begin{cases} 0 & x \leq q \\ 1 & x > q \end{cases}$$

Para este caso en particular, a y b son indiferentes mientras la diferencia entre $f(a)$ y $f(b)$ no exceda q ; si esto se cumple la preferencia es estricta y de valor uno.

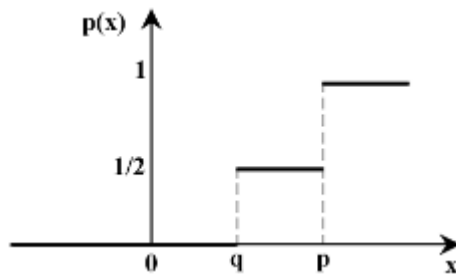
c) **Criterio de Preferencia Tipo III:** Función de preferencia en forma de V



$$p(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ \frac{x}{p} & 0 \leq x \leq p \\ 1 & x > p \end{cases}$$

Esta extensión de la noción de criterio permite al tomador de decisiones preferir progresivamente a sobre b mientras mayor sea la diferencia entre $f(a)$ y $f(b)$. La intensidad de la preferencia aumenta linealmente hasta que la diferencia es igual a p , siendo estricta para valores mayores.

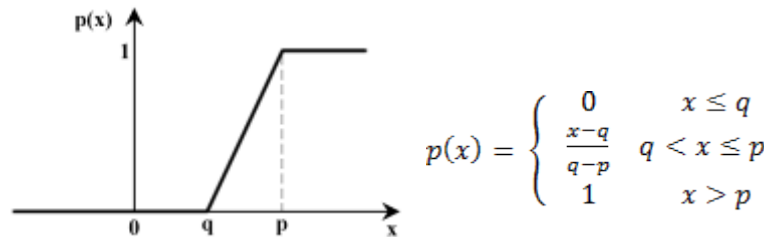
d) **Criterio de Preferencia Tipo IV:** Función de preferencia por niveles



$$p(x) = \begin{cases} 0 & x \leq q \\ \frac{1}{2} & q < x \leq p \\ 1 & x > p \end{cases}$$

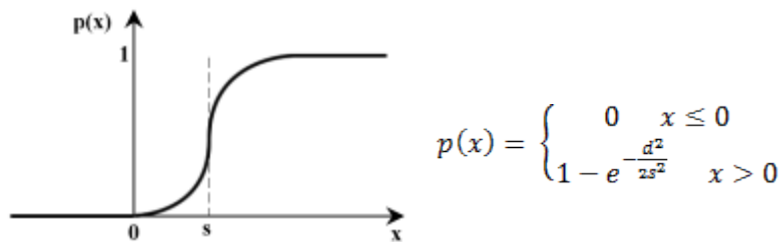
En este caso, a y b son considerados indiferentes cuando la diferencia entre $f(a)$ y $f(b)$ es menor que q ; entre q y p la preferencia es débil (1/2) y para valores mayores la preferencia es estricta. Estos parámetros tienen significado bien definido y pueden ser escogidos por el tomador de decisiones de forma clara de acuerdo a sus conocimientos.

e) **Criterio de Preferencia Tipo V:** Función de preferencia en V con áreas de preferencia e indiferencia.



En este caso el tomador de decisiones considera que a y b son completamente indiferentes si la diferencia entre $f(a)$ y $f(b)$ no excede el valor q . Para valores mayores de esta diferencia la preferencia crece linealmente hasta que alcanza el valor p .

f) **Criterio de Preferencia Tipo VI:** Función de preferencia gaussiana



Si un cierto criterio es definido como de tipo gaussiano se tiene un incremento en la preferencia al aumentar la diferencia entre $f(a)$ y $f(b)$, tal como en los otros criterios. Sin embargo, en este caso el incremento se produce de acuerdo a una distribución normal estadística. Por lo tanto, si la preferencia se define a partir de datos históricos, es fácil para el tomador de decisiones incorporar dicho conocimiento a través del uso del parámetro $e^{-\frac{d^2}{2s^2}}$.

El paso siguiente consiste en definir un índice de preferencia $\pi(a, b)$, que mide el grado de preferencia entre a y b . Para la adopción de la decisión final se consideran dos flujos ordenados, el saliente y el entrante, que reflejan el grado en que una alternativa i domina o es dominada por las restantes alternativas y, se define así:

$$\varphi_i^- = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(i, x)$$

$$\varphi_i^+ = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(i, x)$$

3. METODOLOGÍA

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este proyecto se realizó una revisión bibliográfica de las publicaciones disponibles en las bases de datos de ScienceDirect, CRCnetBASE, PubMed, proyectos de maestría o doctorado, además de libros y documentos disponibles en internet. Esta información da una referencia de las tecnologías que pueden aplicarse y brindan los parámetros de decisión aplicables al problema de tratamiento de aguas de la empresa con las condiciones necesarias.

3.2 INVENTARIO DE PUNTOS DE VERTIMIENTOS Y CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA

Para determinar las características y los caudales utilizados en la empresa, se realizó un inventario de los puntos de vertimientos de efluentes. Se midió el consumo del agua para:

- **Producto:** esto se hace con datos de producción suministrados por la empresa.
- **Lavado de envases:** para realizar el aforo volumétrico se tuvo en cuenta la geometría del recipiente de lavado y la altura de llenado para realizar la actividad.
- **Enjuague de envase:** Se estima el consumo midiendo el agua consumida al lavar cinco envases del mismo volumen y recogiendo el agua consumida en un recipiente para su posterior medición volumétrica. Esto se hace para cada tipo de botella por triplicado y la medida final es el promedio de las tres mediciones.
- **Uso en retretes:** Se estima mediante promedio de visitas al baño del personal que se encuentra laborando en el periodo evaluado.
- **Usos generales:** no se puede medir, pero se puede estimar con el balance de aguas, ya que la diferencia entre el consumo total del periodo evaluado y los consumos estimados de las diferentes etapas sería el consumo de usos generales.

La caracterización fisicoquímica se realizó en la primera etapa del lavado debido que es en este punto donde se concentran la mayor cantidad de contaminantes del proceso de lavado. Se realizó un análisis del agua utilizando una muestra simple, evaluando la cantidad de sólidos totales, sólidos suspendidos, DBO₅, DQO, grasas y aceites, pH, conductividad eléctrica, turbiedad, color, alcalinidad total, dureza total, coliformes totales y coliformes fecales (ver resultados Anexo 2).

3.3 ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA REÚSO DEL AGUA

Para la elección de las tecnologías se tuvo en cuenta que se van a tratar dos corrientes por separado, para un mejor aprovechamiento de las aguas grises y disminución de equipos y corrientes en el proceso. Para el primer sistema de tratamiento, se tuvo en cuenta que las corrientes de lavado provenientes de las etapas uno y dos, se mezclan y se tratan para obtener agua de reúso para ser reutilizada nuevamente en la primera etapa de lavado, en la limpieza de pisos o en usos generales. En este caso el tratamiento necesario para el influente se determina por los requerimientos del efluente para reúso, para lo cual se tiene en cuenta que el agua resultante se usará en los procesos ya mencionados, los cuales no requieren de una alta calidad del agua.

Para el segundo sistema de tratamiento, se utilizará la corriente producida en la etapa de enjuague final. Ya que el efluente producido en esta corriente tiene pocos contaminantes, se tratará por separado con un proceso sencillo que permita el uso de esta corriente en la segunda etapa de lavado y en usos como agua de las cisternas de las baterías de baños.

Para la selección final se tiene en cuenta minimizar el uso de recursos, materiales y mano de obra, el consumo de energía, la cantidad del efluente no tratado final, facilitar la operación y mantenimiento, para obtener una solución de fácil implementación por parte de la empresa.

3.4 CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LA DECISIÓN FINAL

Con datos obtenidos de artículos que indican la remoción de DBO, sólidos suspendidos y coliformes totales para cada tecnología, se mide la calidad del agua resultante a obtener luego de emplear el sistema de tratamiento, pero como son datos que no están ajustados a la solución específica de la empresa y los resultados no pueden considerarse como reglas del diseño final, esta información

se valora cualitativamente de mejor, a peor, en una escala de cinco pasos (Muy Bueno, Bueno, Promedio, Malo, Muy Malo). Esta información se emplea en el software Visual PROMETHEE como criterios para la selección de la tecnología adecuada. Además se utilizaron datos de costos de equipos, insumos, consumos eléctricos, área empleada y capacidad de tratamiento, los cuales son necesarios para encontrar la solución idónea para la empresa. Para la evaluación de los costos de la implementación de las tecnologías se usaron los precios de diferentes tiendas en línea de Estados Unidos, debido a que estos precios son más estables en el tiempo.

En el aspecto económico se evalúan no sólo los costos mencionados anteriormente, sino también el volumen de agua consumido y la actividad donde se realiza este consumo, para así determinar en qué puntos del proceso es viable intervenir para lograr un resultado óptimo en la solución. Además se evaluarán el costo de la implementación de las tecnologías, para lo que se usaron los precios de diferentes tiendas en línea de Estados Unidos y Colombia, esto se hizo de esta manera debido a que estos precios son más estables en el tiempo.

3.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN LA EMPRESA

Se realizara la estimación de costos de instalación, estimación de la cantidad del agua reutilizada, costos de mantenimiento y electricidad, así como la tasa de retorno de la inversión para implementar el sistema.

3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente, se analizaran los resultados obtenidos del software y de la evaluación económica, para dar posteriormente un informe a la empresa que les sirva de herramienta de decisión para el proceso de implementación de la tecnología de tratamiento de aguas de lavado.

4. RESULTADOS

El agua obtenida de un proceso de reúso, puede satisfacer casi cualquier tipo de requerimiento siempre y cuando sea apropiadamente tratada para asegurar la adecuada calidad para su uso final. Cuando su uso es para consumo humano, se requiere de un tratamiento muy exhaustivo. Muchas aplicaciones de reúso de aguas de desecho pueden tener costos menores que si se usara agua tratada de acueducto, con ahorros derivados de un consumo más eficiente y una reducción del volumen total de aguas residuales que van al sistema de alcantarillado.

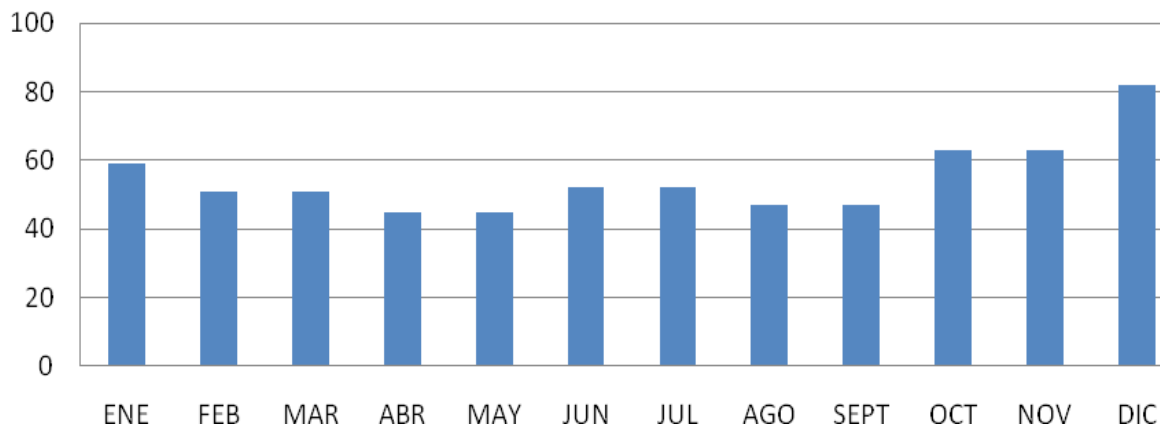
Con el fin de satisfacer los requisitos necesarios para el uso del agua residual, es necesario implementar sistemas de tratamiento para estas aguas, antes de usarlas en cualquier aplicación, y así garantizar un nivel adecuado de desinfección, control de contaminantes y patógenos.

A continuación se ofrecen los resultados obtenidos para el tratamiento de aguas residuales y las opciones para minimizar el riesgo para la salud pública, así como el impacto ambiental originado por los vertidos de dichas aguas.

4.1 BALANCE GLOBAL DE AGUA DE LA EMPRESA

El objetivo de un balance global de agua es acumular todos los volúmenes de agua manejados, individuales y tipificados; y compararlos contra el volumen de agua suministrado al inmueble, tal como lo registró el medidor principal.

Gráfico 1. Registros de consumos de agua del 2012 en la facturación del AMB.

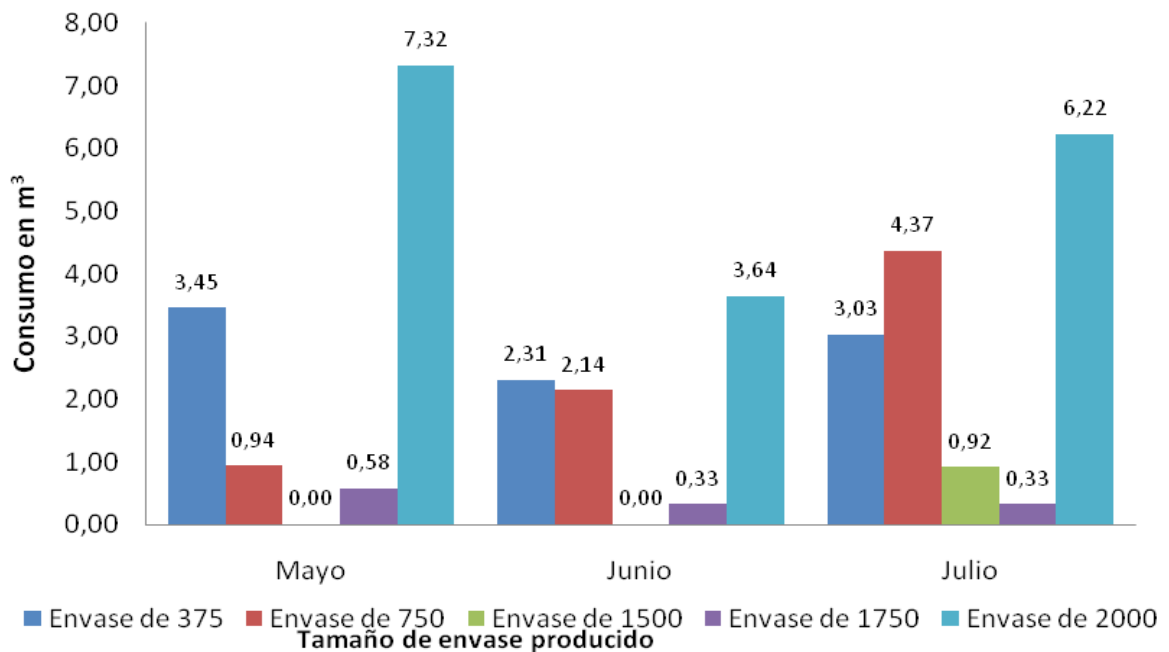


Para realizar este balance se toma como partida los datos suministrados por la empresa de los meses de Mayo, Junio y Julio del año 2012.

4.1.1 Consumo de Agua en Producto

En el Gráfico 2 se muestra la producción en la empresa en los meses antes mencionados. En la producción de los tres meses se usaron alrededor de 37m³ de agua en el producto final (la suma de los totales producidos es de 36.62m³, pero se redondea a 37m³ debido a las pérdidas normales de la producción). Se debe tener en cuenta que para producir el licor final se tuvo que consumir agua también en los procesos de lavado de envase, enjuague, lavado de equipos y planta de producción, además del agua que es usada por los empleados en usos generales y de uso sanitario.

Gráfico 2. Producción de licores de los meses de mayo, junio y julio de 2012 (tamaños de envases de 375, 750, 1500, 1750 y 2000 L).



Se requiere aclarar que la empresa no cuenta con registros detallados de los consumos de agua puntuales, así como no se tienen registros de los envases rotos o que salen de la línea por presentar impurezas o irregularidades.

4.1.2 Lavado de Envases

Para estimar el consumo de agua en la etapa de lavado se hizo un aforo volumétrico teniendo en cuenta que la geometría del recipiente (Tanque multiuso unicapa de 500 LITROS) el cual es un cono truncado de 72cm de diámetro inferior, 106 de diámetro superior y 85cm de altura. El tanque se llena 50cm, por lo que podemos estimar que el volumen es de 260 litros aproximadamente. El cálculo del consumo de agua de los meses de mayo a julio se realiza teniendo en cuenta que se realizaron 199 baches de lavado para el número de envases registrados en la producción. Se estima que el agua de cada tanque de lavado sirve para dos baches de lavado, lo que da un consumo aproximado para estos tres meses de 53m³ de agua del acueducto (ver detalles en Tabla 9).

4.1.3 Enjuague de Envases

Para estimar el consumo de agua en el enjuague de envases, se realizaron las siguientes mediciones. Se dividieron los volúmenes de botellas en tres tamaños, tamaño uno para botellas de 375mL, tamaño dos para botellas de 750mL y tamaño tres para botellas de 1500, 1750 y 2000mL. Se realizaron tres mediciones usando una cubeta que recoge el agua del enjuague de cinco envases, en la tabla 8 se ven los resultados de estas mediciones. Para calcular el consumo de agua en el proceso de enjuague se multiplicaron el número de envases lavados por el consumo por embase dependiendo del tamaño. Este cálculo da un consumo de los tres meses de 22m³, para mas detalles ver tabla 9.

Tabla 8. Estimación de consumo de agua en el enjuague de envases.

	Tamaño1	Tamaño2	Tamaño3
Medición 1 (5 bot)	1.8L	2.14L	3.02L
Medición 3 (5 bot)	1.5L	2.08L	2.44L
Medición 2 (5 bot)	1.71L	1.9L	2.52L
Promedio	1.67L	2.04L	2.66L
Litros por botella	0.334L	0.408L	0.532L

Tabla 9. Cálculo de consumo de agua en el enjuague de envases.

Presentación envase * mL	# envases x lote	# lotes de lavado	Consumo agua Lavado Etapas 1 y 2 (m ³)	Consumo agua Enjuague (m ³)	Consumo agua Lavado + Enjuague (m ³)
375	540	56	14.90	10.04	24.94
750	350	37	9.84	5.32	15.16
1500	120	6	1.60	0.37	1.97
1750	120	8	2.13	0.48	2.61
2000	120	92	24.47	5.86	30.33
TOTALES		199	52.94	22.07	75.01

Figura 4. Plano de la planta de producción (primer piso) con sus diferentes puntos de uso de agua.

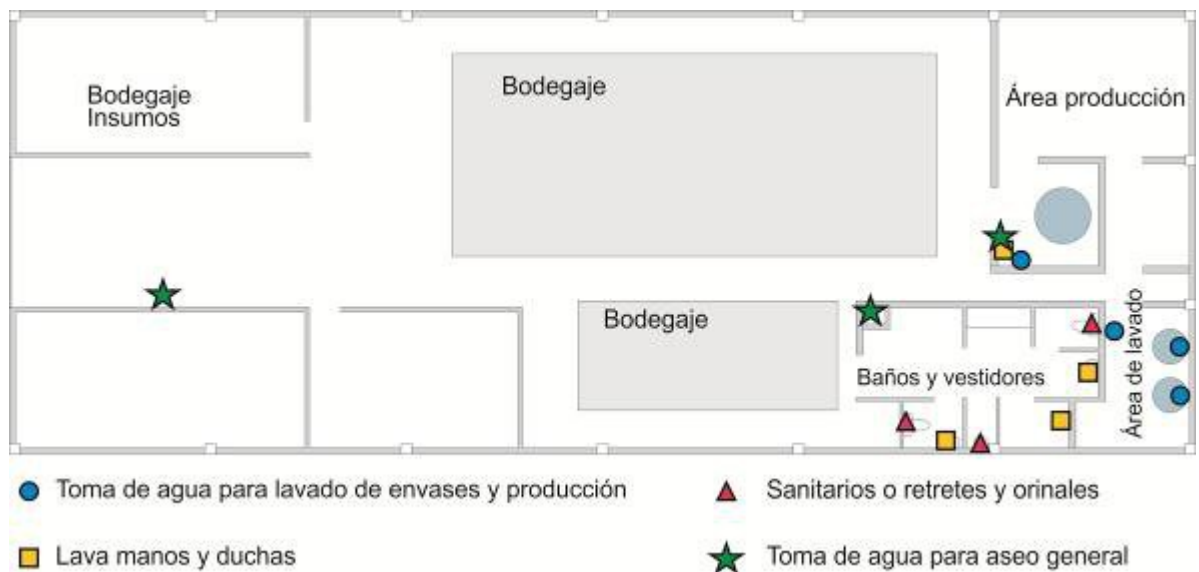
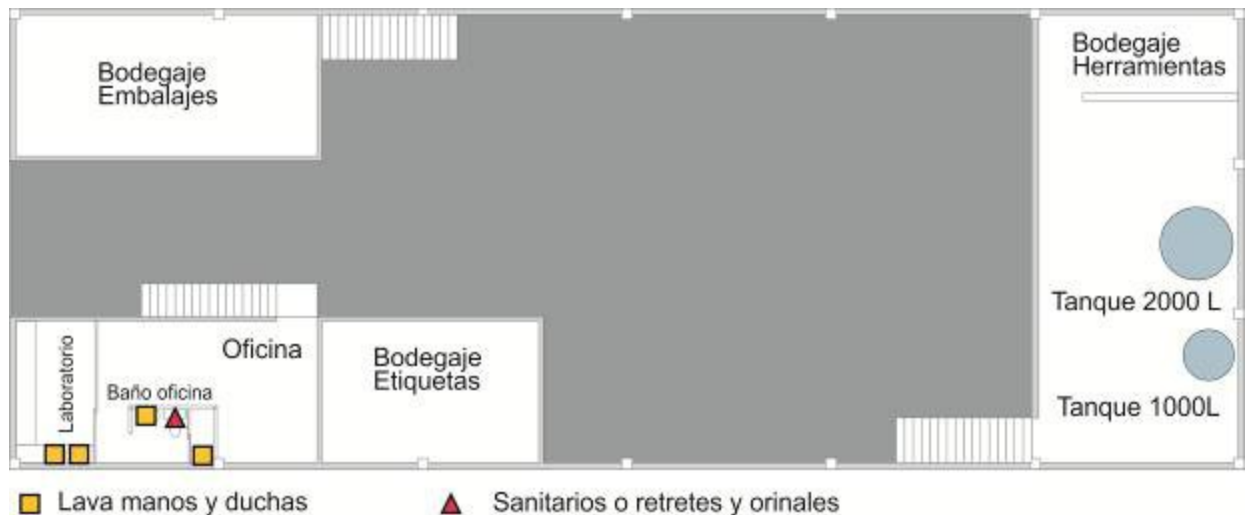


Figura 5. Plano de la planta de producción (segundo piso) con sus diferentes puntos de agua.



4.1.4 Lavado de Áreas de Producción

El Decreto 1686 de 2012 establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir para la fabricación de bebidas alcohólicas destinadas para consumo humano. Para ello se refiere en el artículo 34 y 35 al saneamiento de las áreas de fabricación y envase de bebidas alcohólicas [31]. La empresa implementa un programa de limpieza y desinfección periódicas para el área de producción y envase del producto. En este caso no se tienen datos de referencia que puedan indicar cuál es el consumo real de este proceso por lo que este consumo se estima partiendo de que el balance del consumo de agua debe ser cero. En las Figuras 4 y 5, se representan estos puntos de lavado con una estrella verde.

4.1.5 Uso de Batería de Baños

La empresa cuenta con cuatro baterías de baño y un orinal para uso de los empleados, los cuales están representados por un triángulo rojo en las figuras 4 y 5. En estos puntos se consume una cantidad considerable de agua. El uso del retrete por persona es de entre 4 y 6 veces por día [32], por lo que se hace la presunción de que el uso de sanitarios es de 5 veces diarias por persona. Los sanitarios tienen cisternas de 6L. Se calcula el consumo de los tres meses para seis personas que son el personal mínimo en la empresa (Como se ve en el

Grafico 1, los meses evaluados son de baja producción por lo que se tiene personal mínimo). El consumo total de los tres meses para este ítem sería de 12.67m³, lo cual representa un gasto importante, ya que equivale al 8.5% del consumo total de los tres meses evaluados (ver detalles en Tabla 10).

4.1.6 Consolidado de los Consumos de Agua

Se debe aclarar que, aunque se usan los datos del acueducto para realizar el balance de aguas, estos datos llevan una cierta incertidumbre asociada, debido a que la toma de datos del medidor no se realiza el primero de cada mes, sino en un periodo que puede superar la semana. Por esto los consumos no representan el consumo del mes del día 1 al 30, sino el consumo desde la última toma de datos del medidor. Para minimizar el error asociado a este factor, se toma el consumo promedio de los tres meses evaluados (mayo, junio y julio de 2012) para disminuir la incertidumbre en la medida.

De la Tabla 10 podemos ver que las etapas de lavado y enjuague de envases, consumen el 50% del agua empleada en la empresa durante los tres meses evaluados y que el agua usada en el propio producto es el 24.6% del total empleado.

Tabla 10. Consolidado de consumos de agua de mayo a julio, dividido por actividades.

Mes	Producción licores m ³	Lavado envases m ³	Enjuague envases m ³	Uso sanitarios m ³	Usos generales m ³	Consumo Total m ³
Mayo	13.3	19.68	7.97	4.22	-0.17	45
Junio	8.4	12.24	5.34	4.22	21.8	52
Julio	14.9	21.01	8.77	4.22	3.1	52
Total	36.6	52.93	22.08	12.67	24.72	149
Porcentajes	24.6%	35.5%	14.8%	8.5%	16.6%	100%

Tabla 11. Datos del consumo de agua del AMB año 2012.

Facturado Año 2012												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Consumo	59	51	51	45	45	52	52	47	47	63	63	82
Acueducto	130380	114144	114144	101967	101967	116173.5	116173.5	106026	106026	138498	138498	177058.5
Alcantarillado	80806.5	70474.5	70474.5	62725.5	62725.5	71766	71766	65308.5	65308.5	85972.5	85972.5	110511
Total	211186.5	184618.5	184618.5	164692.5	164692.5	187939.5	187939.5	171334.5	171334.5	224470.5	224470.5	287569.5
Consumo anual acueducto y alcantarillado COP\$ 2'364,867.00												

La tabla 11 muestra los datos de la facturación del año 2012 y discrimina el valor facturado de acueducto y alcantarillado (no está incluido el costo de recolección de basuras ya que éste no tiene relación con el caso de reúso de agua), con un consumo anual de 657m³ que tienen un valor de COP\$2'364,867. En estos datos se evidencia una oportunidad de mejora que reduzca el consumo de agua y disminuya los costos de operación de la empresa.

4.1.7 Caracterización de Aguas de Lavado

Para conocer las características fisicoquímicas de los efluentes provenientes de la etapa de lavado se evaluaron los parámetros presentados en la Tabla 12. Estos parámetros se midieron en los efluentes salientes de la etapa uno del proceso de lavado de envases. Se tomaron los datos en este punto, dado que este representa los efluentes más cargados de contaminantes. Los efluentes salientes de la segunda etapa de lavado, y los subsecuentes enjuagues se consideran con menor carga contaminante.

Tabla 12. Resultados de la caracterización de las aguas de lavado de envases (primera etapa) en Bodegas del Cañizal.

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDADES	MÉTODO DE ANÁLISIS
Sólidos Totales	859	mg/L	S.M. 2540 B
Sólidos Suspendidos	37.9	mg/L	S.M. 2540 D
DBO ₅	324	mg O ₂ /L	S.M. 5210 B
DQO	546	mg O ₂ /L	S.M. 5220 C
Grasas y Aceites	110	mg/L	S.M. 5520 B
pH	11.47	Unidades de pH	S.M. 4500 H ⁺
Conductividad Eléctrica	1741	µs/cm	S.M. 5210 B
Turbiedad	9.97	NTU	S.M. 2130 B
Color	125	mg Pt/Co	Método Estándar Platino-Cobalto APHA
Alcalinidad total	378	mg CaCO ₃ /L	S.M. 2320
Dureza Total	60	mg CaCO ₃ /L	S.M. 2340 C
Coliformes Totales	<3	NMP/100mL	NTC 4458
Coliformes Fecales	<3	NMP/100mL	NTC 4458

S.M.: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21^a Edition, 2005, APHA. AWWA, WEF.

* Límite de cuantificación del método.

Fuente: PSL Proanálisis LTDA, (Laboratorio de análisis acreditado IDEAM NTC ISO - IEC 17025)

Tabla 13. Caracterización de aguas grises de la empresa piloto e intervalos normales.

Parámetro	Agua de la Empresa	Intervalos Normales para Agua Gris
pH	11.47	5-10.9
Sólidos totales mg/L	859	113–2410
Sólidos Suspendidos (SS) mg/L	37.9	3.1–330
DBO5 mg/L	324	33–1460
DQO mg/L	546	3.8–1380

Fuente: adaptado de "Fouling in greywater recycling by direct ultrafiltration". [15]

Los datos obtenidos en esta caracterización confirman que el efluente del proceso de lavado tiene las mismas características que el de las aguas grises de la literatura. En la Tabla 12 podemos ver que los resultados obtenidos en la muestra en DBO₅, DQO, Sólidos Totales, Sólidos Suspendidos 324, 546, 859 y 37.9 respectivamente están dentro de los rangos mostrados en la tabla 13 que corresponden a aguas grises, el pH es el único valor que se sale del rango normal que está entre 5-10.9 y en la muestra obtenida en la empresa fue de 11.47.

4.2 PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE DESECHO

Para seleccionar las alternativas a evaluar, se tiene en cuenta que:

- Todas cumplan con un mínimo de calidad del efluente, ya que en el tratamiento de aguas grises revisado en la literatura, existen procedimientos que solo mejoran el agua en un nivel mínimo para su uso inmediato en labores que requieran aguas de calidad muy pobre.
- El agua obtenida debe ser almacenable sin que se generen problemas de crecimiento bacterial que hagan esta agua inutilizable para la empresa.

Se buscaron alternativas que pudieran ser ensambladas y que brindaran la solución para el tratamiento de aguas grises, la solución 1 es una mezcla de tratamientos que incluyen la filtración lenta con arena, con filtro percolador, sedimentador y ozono. La solución 2 incluye un tren de filtrado (dead-end filtration

o filtración cerrada), con filtro percolador y desinfección con UV. La solución 3 cuenta con un equipo para electrocoagulación, un filtro percolador y desinfección con UV. Las primeras dos soluciones tienen tecnologías convencionales, que son bien documentadas y fáciles de implementar, la solución 3 mezcla tecnologías convencionales como el filtro percolador, con una tecnología emergente como la electrocoagulación que está siendo implementada como una solución novedosa que permite obtener buenos resultados en tratamiento de aguas grises, y que no requieren de grandes áreas para el tratamiento del efluente. La solución 4, es un equipo comercial todo en uno, que realiza todo el proceso de tratamiento de aguas grises. Teniendo en cuenta esta solución que brinda la perspectiva de la tecnología probada, se puede evaluar si es o no viable diseñar la solución y realizar la puesta a punto e implementación de la mezcla de tecnologías propuestas en las soluciones 1, 2 y 3.

Los efluentes a tratar están divididos en dos corrientes. La corriente 1 es una mezcla de las aguas de lavado etapas uno y dos, se trata 520L que están contenidos en los tanques de lavado en el proceso descrito en el numeral **1.2.1 Lavado de Envases**, para esta corriente se presentan cuatro alternativas que se evalúan para su selección final. La corriente 2 es la resultante del proceso de enjuague, se describe en el numeral **1.2.2 Enjuague de Envases**, y no tiene alternativas debido a que es un efluente poco contaminado, y con un proceso simple puede ser tratado a un costo razonable de inversión de insumos y de consumo eléctrico; tampoco se mezcla esta corriente con la corriente 1 porque diluiría el agua contaminada y esto dificultaría el proceso de tratamiento de las corrientes.

4.2.1 Corriente 1: Lavado de Envases

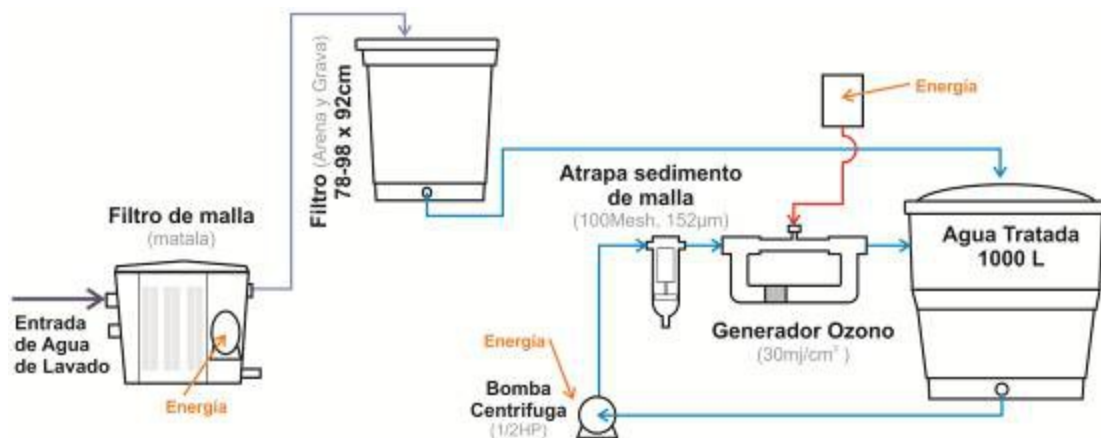
Se deriva del proceso de lavado de envases en las etapas uno y dos (lavado con surfactante y esterilización con TQ BIOPAR al 35%, respectivamente) su caracterización se puede ver en la tabla 12. Las tecnologías necesarias para tratar esta corriente se seleccionaron teniendo en cuenta que deben requerir poco espacio para su instalación y cumplan con los parámetros de calidad del agua deseados, basados en datos de literatura que sustentan los resultados de calidad final estimada. Las alternativas descritas a continuación se evalúan con el método de selección multicriterio PROMETHEE, para conseguir la opción final que se propone a la empresa como solución idónea de tratamiento de aguas de lavado.

El agua resultante del proceso de tratamiento debe ser de alta calidad con DBO y SST $>5\text{mg/L}$ [2], esta sería agua de tipo industrial, y no se usaría en procesos que requieran agua potable. Cada lote de lavado produce 520L de agua residual, y diariamente se pueden producir 1500L de agua para tratar, por lo que la solución debe poder tratar esta cantidad.

4.2.1.1 Solución 1: Filtro Percolador, Filtro de Arena, Sedimentador y Ozono

Esta tecnología combina tratamientos primarios, secundarios y terciarios. La solución está compuesta por un prefiltro de malla tridimensional (filtro percolador) seguido del filtro de arena con capacidad para 450L/h (filtración lenta por arena), el agua tratada se vierte en el tanque reservorio de 1000L y se recircula con una bomba centrífuga a través de un filtro precipitador (filtro atrapa sedimentos) y una desinfección con ozono (ozonificador). Esta configuración es seleccionada porque es una tecnología simple, fácil de operar y muy documentada. La configuración básica puede verse en la figura 6.

Figura 6. Esquema solución 1, filtro percolador, filtro de arena, sedimentador y ozono.



4.2.1.1.1 Filtro Percolador Matala, Marca Aqua2use

El proceso inicia descargando los tanques de lavado hacia un filtro percolador para aguas grises marca Aqua2use (Matala) referencia “UG GWDD” (ver Figura 7), que sirve como barrera primaria para las partículas grandes. Además el sistema “Matala” de filtración mejora las características del agua (ver Tabla 14),

reduciendo la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) la demanda química de oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos (SS) Matala es una malla fabricada en un material plástico comúnmente usado en estanques de peces y algunas aplicaciones de tratamiento de agua [9]. Es un filtro tridimensional que forma una película biológica en el enmallado y aumenta el tiempo de retención de aire y agua en el filtro. El equipo cuenta con una bomba de agua sumergible de ¼HP que impulsa el agua filtrada para llevarla al filtro de arena. Se deben realizar mantenimientos de rutina cada 2 meses para limpiar los filtros y evitar que se saturen. El flujo de la bomba es de 100L/min y el área que ocupa el filtro percolador matala Aqua2use UG GWDD es de 0.24m².

Tabla 14. Caracterización de aguas grises evaluadas por el fabricante Aqua2use.

Análisis	Influyente	Efluente	Unidades	Método prueba	Error	Límite de detección
DBO	248	124	mg/L	TM02	± 8%	3
DQO	771	269	mg/L			
SS 300 L/h	473	47	mg/L	TM12	± 5%	2
SS1380 Lh	680	171	mg/L	TM12	± 5%	2

Análisis de lodos: (9.6 kg de lodos húmedos fueron colectados del filtro después de pasar 40.000L por el dispositivo)

Fuente: Adaptado de datos del fabricante [Aqua2use® GWDD](#)

Figura 7. Filtro de malla Aqua2use UG GWDD.



Fuente: Página web [Aqua2use® GWDD](#)

4.2.1.1.2 Filtro de Arena

Para filtrar el agua producida en los lotes de lavado, que alcanzan los 520L, se emplean tres tanques en paralelo de 500L (las dimensiones del tanque son: diámetro inferior 78cm, diámetro superior 98cm y altura de 92cm) rellenos con una capa de grava y arena fina (filtro de arena de flujo lento) de diseño BSF (BioSandFilter). Estos filtros contienen un relleno de 60 cm, compuesto por 5cm de roca, 5cm de grava y 50cm de arena [33]. Con aproximadamente 500kg de arena de 20-30 (arena sílice mezclada de 0.2 y 0.3mm), se puede lograr un flujo de entre 0.1 a 0.3m³/m²h [34], por lo que el filtro construido puede tener un flujo de 60 a 180L/h por tanque. Como el flujo es muy lento se requiere el uso de tres filtros en paralelo que aumentan el caudal del efluente, por lo que se podría procesar el agua proveniente del lavado (520L) en una hora aproximadamente. La ventaja que tiene esta configuración, es que permite realizar el mantenimiento sin detener completamente el proceso ya que cuando uno de los filtros esté en revisión, los otros dos pueden estar funcionando.

La remoción de contaminantes del agua de lavado que se puede conseguir con esta tecnología, no se puede estimar con precisión, ya que dependiendo de la configuración los resultados obtenidos del agua filtrada, varían entre autores, de los cuales se puede ver una comparación en la Tabla 15. Para mantener buenas cualidades de filtración se recomiendan 2 mantenimientos anuales que consisten en eliminar los primeros 5 cm de arena y reemplazarlos por arena nueva. El área ocupada por los tres tanques de filtrado de 500L es de 3m².

Tabla 15. Comparación porcentaje de remoción de filtro de arena por diferentes autores.

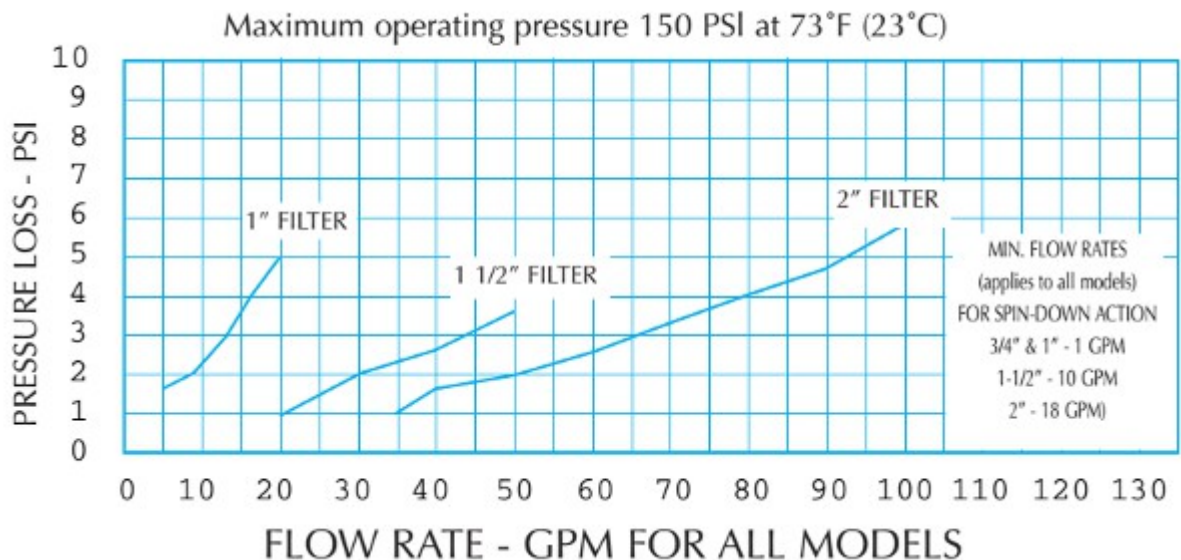
ARTICULO	DBO5 (mg/L) Remoción %	SS (mg/L) Remoción %	CT (cfu/100 mL) Remoción %
Gerba, 1995 [35]	96.6	57.5	99.8
Gardner & Millar, 2003 [36]	93.8	93.7	99.5
Lee, 2001 [37]	-	-	99.5
Pickford, 1997 [38]	-	-	97.3
VALORACIÓN	MB^a	B^c	MB^a

^a Muy Bueno, ^b Bueno, ^c Promedio, ^d Malo, ^e Muy Malo

4.2.1.1.3 Filtro Atrapa Sedimento

El agua filtrada es llevada al tanque reservorio de 1000L y con una bomba centrífuga, el agua se bombea en un ciclo cerrado que la pasa por una etapa de filtración y otra de ozonificación durante 25 minutos, con esto se consigue una buena desinfección del agua tratada. La bomba de 400W, tiene un flujo de 40L/min.

Figura 8. Curvas de presión para filtros Rusco.



Fuente: Fabricante filtros Rusco

Con el fin de reducir el flujo de sedimentos hacia el tratamiento de desinfección, el agua se pasa por un filtro atrapa sedimento “Rusco 100ST-F”, con una malla 100 equivalente a 152µm, en el Gráfico 3 podemos ver que la pérdida de presión para un caudal de 40L/min es de 2.5PSI y presión máxima de operación del filtro es 150PSI. Este filtro actúa usando la fuerza centrífuga para separar las partículas y hace que caigan en un sistema de almacenamiento de donde se puede purgar fácilmente. Se debe revisar el filtro por lo menos una vez a la semana para purgar el sedimento acumulado, esto puede variar en la práctica, dependiendo de la cantidad de sedimento que se produzca. El filtro con un uso adecuado, tiene vida útil ilimitada.

4.2.1.1.4 Desinfección con Ozono

Para garantizar una adecuada desinfección, con UV o cloro, el agua debe tener un nivel mínimo de partículas, que no superen los 5mg/L de sólidos suspendidos [18]. El sistema de filtro de arena no garantiza concentraciones mínimas de sólidos suspendidos (puede tener remociones bajas de SS desde 57.5% [35]), por lo que el sistema de desinfección más adecuado es la oxidación con ozono, con una dosis de 0.4mg/L. Para lograr la desinfección adecuada, el sistema recircula el agua durante 25 minutos [39]. El equipo empleado para la generación del ozono es el DEL ozone “Eclipse II” que produce 500mg/h de ozono a 700ppm con un inyector, que mejora la dosificación del ozono. La vida útil del equipo es de 15,000 horas, por lo que este se considera que funcionará durante más de 5 años.

4.2.1.1.5 Calculo consumo de la solución 1 por m³

El cálculo del consumo eléctrico para tratar 1m³ de agua con la solución 1, se realiza sumando los consumos de la bomba de ¼ HP del filtro matalla (W_m), la bomba centrífuga de ½ HP (W_b) y el consumo del generador de ozono (W_o), a continuación se calcula el consumo total de la solución 1:

Características de la bomba (W_m):

- Caudal: 6 m³/h
- Potencia: 200 W (¼ HP).
- Voltaje: 110 V, 60 Hz.

$$W_m = \frac{200W/h}{\frac{6m^3}{h}} = 33.34W/m^3$$

Características de la bomba (W_b):

- Caudal: 2.4 m³/h
- Potencia: 400 W (½ HP).
- Voltaje: 110 V, 60 Hz.

$$W_b = \frac{400W/h}{\frac{2.4m^3}{h}} = 166.67W/m^3$$

Características del generador de ozono (W_o):

- Tiempo: 0.84h
- Potencia: 20 W
- Voltaje: 110 V, 60 Hz.

$$W_o = \frac{20W}{h} * 0.84h * 1m^3 = 16.8W/m^3$$

El consumo eléctrico de la solución 1 (W_{s1}) es:

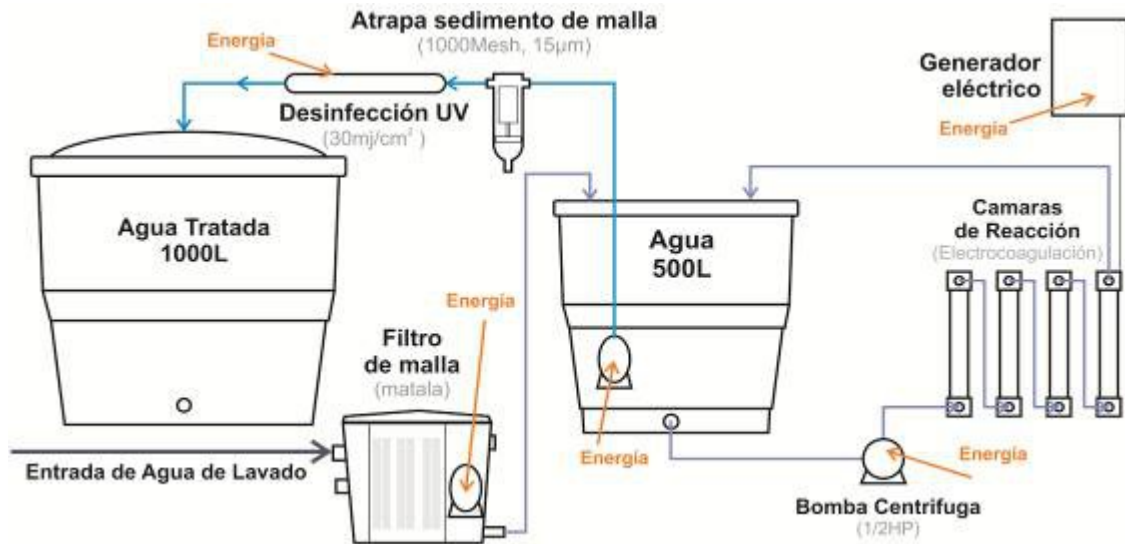
$$W_{s1} = W_m + W_b + W_o = 33.34 + 166.67 + 16.8 = 216.81W/m^3$$

La Tabla 20 muestra el resumen de todos los criterios seleccionados para la evaluación de la solución 1 “Filtro Percolador, Filtro de Arena, Sedimentador y Ozono”, los cuales serán los datos de entrada para el software Visual PROMETHEE.

4.2.1.2 Solución 2: Filtro percolador, Electrocoagulación, Sedimentador y UV.

El tratamiento se realiza en un tanque de 500L que contiene el agua de lavado de los envases. Esta agua sin tratar, se pasa por el filtro percolador matale que elimina las partículas gruesas, y con la bomba que este equipo incluye, se llena el tanque de tratamiento. Al terminar el proceso se inicia el periodo de circulación que fomente la coagulación de los sólidos suspendidos. Pasados unos minutos, se enciende la bomba sumergible y el agua coagulada pasa por un filtro de sedimentos que retiene las partículas grandes y finalmente por el equipo de desinfección por ultravioleta (ver Figura 9).

Figura 9. Esquema Solución 2: Filtro percolador, Electrocoagulación, Sedimentador y UV.



4.2.1.2.1 Filtro Percolador Matala, Marca Aqua2use

El proceso de tratamiento de esta solución, inicia con el filtro percolador matala Aqua2use UG GWDD. La información referente a este equipo no se amplía porque ya se trató anteriormente. La función principal es refinar el agua para evitar que partículas de gran tamaño queden atrapadas en las cámaras de reacción. Este filtro mejora las condiciones iniciales del agua y reduce la cantidad de sólidos en el agua a tratar por electrocoagulación.

4.2.1.2.2 Electrocoagulación

En el mercado existen equipos de electrocoagulación comerciales como el "Electroflocculation / Electrocoagulation Based Water Cleaning Systems" SSHF-1000 (costo US\$11,200), el "EfloEC - Electro Coagulation" (costo US\$18,000) y el Mi-T-M® ECF-0M1R (costo, alrededor de US\$25,000). Debido al alto costo de estas soluciones se propone el diseño del equipo, teniendo en cuenta que en este caso se requerirían ensayos de puesta a punto del equipo, si esta fuera la alternativa seleccionada. Los equipos básicos necesarios para el diseño serían un generador eléctrico Pyramid PS52KX 50-Amp de 800W, cuatro cámaras de reacción con electrodos que tienen un área de 0.4m², con platinas de aluminio de

25.4 x 100cm, y una bomba centrífuga de ¾HP que tiene la función de hacer pasar el agua de lavado por las cámaras de reacción en un circuito cerrado durante 60 minutos (el tiempo se ajustaría en la puesta a punto del equipo). En la literatura se pueden encontrar tiempos para lograr la remoción que varían entre 5 y 100 minutos [40]. El diseño de este equipo se basa en el equipo Mi-T-M® ECF-0M1R, que cuenta con cuatro cámaras de reacción, con una capacidad de 20 gal y una corriente de 20Amp a 220V.

El método de electrocoagulación reemplaza los químicos del método de coagulación química (sulfato de aluminio) minimizando la adición de reactivo y mejorando la eficiencia de la remoción [41]. Después de ocurrida la decantación de los flóculos, una bomba sumergible de 350W extrae el agua del tanque de lavado y la hace pasar por un filtro precipitador que elimina los sólidos remanentes. En la Tabla 16 se pueden ver los diferentes porcentajes de remoción presentados por diferentes autores en la literatura, así como equipos comerciales que reportan sus resultados.

El mantenimiento del equipo estaría dado por el lavado del tanque de sedimentación por cada dos lotes de lavado. Esta actividad puede tardar 35 minutos diarios para 6 lotes de lavado. Se estima que se debe realizar un reemplazo anual de los electrodos gastados.

Tabla 16. Comparación porcentaje de remoción por electrocoagulación.

ARTICULO	DBO ₅ (mg/L)	SS (mg/L)	CT (cfu/100 mL)
	Remoción %	Remoción %	Remoción %
Lin, et al., 2005 [42]	60.9	69	100
Barrera-Díaz, et al., 2009[43] MORANTE G. y Gonzalo. 2002[44]	89	-	99
Merzouk et al., 2009 [45]	88.9	85.5	-
Electrofloculation s. f. [46]	96.9	92.1	99
Grey Water Recycling s. f. [47]	81.5	92	98
VALORACIÓN	B^b	B^b	MB^a

^a Muy Bueno, ^b Bueno, ^c Promedio, ^d Malo, ^e Muy Malo

4.2.1.2.3 Filtro Atrapa Sedimento

Para reducir el posible flujo de sedimentos que pueda ser perjudicial en el tratamiento de desinfección, el agua se pasa por un filtro atrapa sedimento “Rusco 3/4-1000-F 1000”, con una malla 1000 equivalente a $15\mu\text{m}$. Este filtro actúa usando la fuerza centrífuga para separar las partículas y hace que caigan en un sistema de almacenamiento de donde se pueden purgar fácilmente. El filtro de este tamaño de poro se puede saturar rápidamente, pero se espera que la electrocoagulación produzca sedimentos de gran tamaño que precipiten fácilmente. Se debe revisar el filtro por lo menos una vez a la semana para purgar el sedimento acumulado, esto puede variar en la práctica, dependiendo de la cantidad de sedimento que se produzca. El filtro con un uso adecuado, tiene vida útil ilimitada.

4.2.1.2.4 Desinfección por Ultravioleta (UV)

La irradiación con luz ultravioleta es la alternativa más comúnmente usada para desinfectar aguas para reúso, ya que es un método de desinfección más eficiente para control de virus y bacterias que la cloración. El éxito de la tecnología UV es atribuido al bajo costo y la ausencia de subproductos tóxicos [48]. El equipo propuesto es marca Watts “HSUV-SS-8-1” 8-GPM que tiene una fuente que emite luz con longitud de onda de 245 nm, suficiente para dañar el ADN y ARN de las células y causarles la muerte. La vida útil de la bombilla es de 9,000 horas por lo que fácilmente puede durar 4 años. El consumo de la lámpara es de 8W.

4.2.1.2.4 Cálculo consumo de la solución 2 por m^3

El cálculo del consumo eléctrico para tratar 1m^3 de agua con la solución 2, se realiza sumando los consumos de la bomba de $\frac{1}{4}\text{HP}$ del filtro matalla (W_m), la bomba centrífuga de $\frac{3}{4}\text{HP}$ (W_b), la bomba sumergible de 350W (W_s), el consumo del generador de eléctrico (W_e) y el consumo del equipo de desinfección UV (W_{uv}). A continuación se calcula el consumo total de la solución 2:

Características de la bomba (W_m):

- Caudal: $6\text{ m}^3/\text{h}$

- Potencia: 200 W (¼ HP).
- Voltaje: 110 V, 60 Hz.

$$W_m = \frac{200W/h}{\frac{6m^3}{h}} = 33.34W/m^3$$

Características de la bomba (W_b):

- Tiempo: 1h
- Caudal: 3 m³/h
- Potencia: 600 W (¾ HP).
- Voltaje: 110 V, 60 Hz.

$$W_b = \frac{600W/h}{\frac{1m^3}{1h}} = 600W/m^3$$

Características de la bomba (W_s):

- Caudal: 5 m³/h
- Potencia: 350W
- Voltaje: 110 V, 60 Hz.

$$W_s = \frac{350W/h}{\frac{5m^3}{h}} = 70W/m^3$$

Características del generador eléctrico (W_e):

- Tiempo: 1h
- Potencia: 800 W
- Voltaje: 110 V, 60 Hz.

$$W_e = \frac{800W/h}{\frac{1m^3}{1h}} = 800W/m^3$$

Características del generador eléctrico (W_{uv}):

- Tiempo: 0.2h
- Potencia: 8 W
- Voltaje: 110 V, 60 Hz.

$$W_{uv} = \frac{8W/h}{\frac{1m^3}{0.2h}} = 1.6W/m^3$$

El consumo eléctrico de la solución 2 (W_{s2}) es:

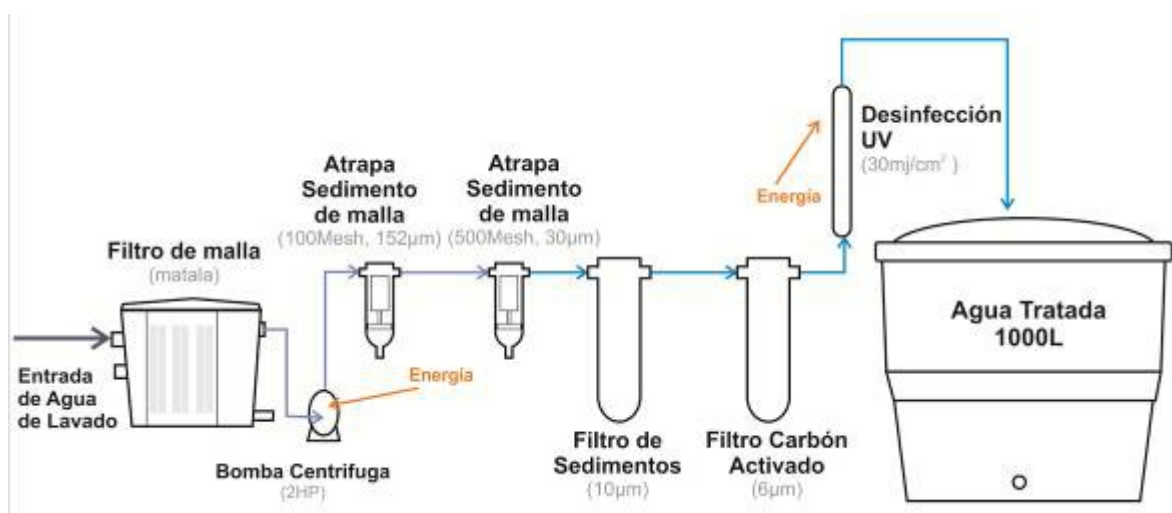
$$W_{s2} = W_m + W_b + W_s + W_e + W_{uv} = 33.34 + 600 + 70 + 800 + 1.6 = 1504.94W/m^3$$

La Tabla 21 muestra el resumen de todos los criterios seleccionados para la evaluación de la solución 2 “Filtro percolador, Electrocoagulación, Sedimentador y UV”, los cuales serán los datos de entrada para el software Visual PROMETHEE.

4.2.1.3 Solución 3: Filtro Percolador, de Partículas, Microfiltración, Adsorción con Carbón Activado y Desinfección UV

El tren de filtración, consta de un prefiltro de malla tridimensional mataala Aqua2use UG GWDD (filtro percolador) seguido de un filtro precipitador (filtro atrapa sedimentos), un micro filtro para sedimentos, un filtro fino de carbón activado y un equipo de desinfección por ultravioleta, luego del cual se descarga el agua tratada a un tanque reservorio de 1000L .En la figura 10 se ve el esquema de tratamiento. Es la solución más compacta, sin gran complejidad, requiere de poca inspección, en este caso lo único que debe cuidarse es el período de trabajo de los filtros, que deben reemplazarse ya sea por tiempo de uso o por inspección de presión de trabajo.

Figura 10. Esquema Solución 3: Filtro percolador, de Partículas, Microfiltración, Adsorción con carbón activado y Desinfección UV.



4.2.1.3.1 Filtro Percolador Matala, Marca Aqua2use

El prefiltro de malla tridimensional Aqua2use UG GWDD del que se habló anteriormente, retiene las partículas más gruesas, papeles y otros contaminantes orgánicos e inorgánicos (es un filtro percolador que mejora las condiciones iniciales del efluente para evitar agotar rápidamente los filtros de trabajo).

4.2.1.3.1 Filtro de Partículas

La fase de filtración de partículas consta de un proceso en dos etapas, cada una con tamaño de corte de 152µm y 30µm. Los filtros Rusco 100ST-F y 500ST-F tienen una malla de acero inoxidable que cumple la función de retener los sedimentos, removiendo el material particulado cuando atraviesa la malla, equipos equivalentes pueden lograr remociones en aguas grises de sólidos suspendidos del 82% [27]. En la figura 11 se muestran los tipos de contaminantes que retiene el filtro Rusco, dependiendo del tamaño de la grilla.

Figura 11. Filtro RUSCO, tamaño de poro y contaminantes que retiene.

	Mesh Size:	Micron Rating:	Protection For:	Contaminant:
Larger Openings	24	711	General use	
	30	533	General use	Shale, Sand, Shell or Debris
	40	381	General use	Pipe Scale & Coarse Sand
Smaller Openings	60	254	Sprinkler Systems, Faucet Aerators & Sand Sensitive Valves	Fine Sand
	100	152	Poultry Growers & Watering Devices	Grit
	140	104	Drip Irrigation Systems, Faucet Aerators & Sand Sensitive Valves	
	250	61	Fogger Spray Nozzles	Very Fine Sand & Grit
	500	30	Pre-treatment	
	1000	15	Pre-treatment for Ultra Filtration & Reverse Osmosis	Ultra-fine, Fine-grained, Powder or Dustlike Sediment

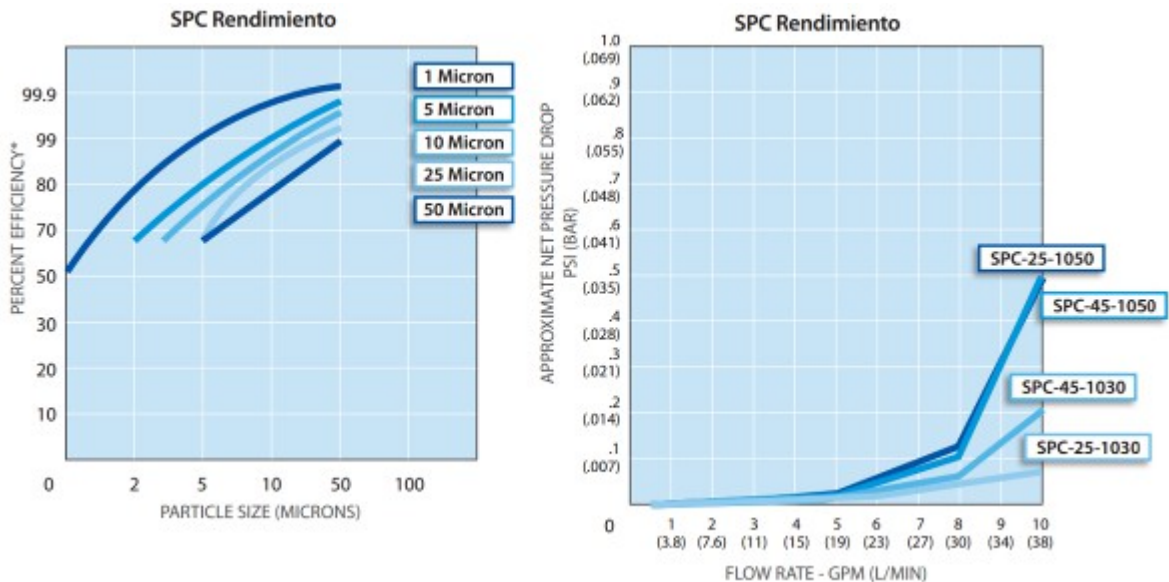
This Image/Chart is the sole property of FreshWaterSystems, Inc.

Fuente: http://www.freshwatersystems.com/p-953-polyester-filter-screens-for-spin-down.aspx?utm_source=shopzilla&utm_medium=Feed&utm_campaign=Product&utm_term=FS-1-1/2-500

4.2.1.3.2 Microfiltración y Adsorción con Carbón Activado

La microfiltración consta de dos etapas adicionales, cada una con tamaño de corte de 10 μ m y 6 μ m, se emplean para esta filtración cerrada (dead-end filtration), este sistema fuerza el agua a través de la membrana que retiene los contaminantes, una capa de contaminante se forma en el filtro lo que hace que el flujo de agua tratada decaiga con el tiempo [49]. La primera parte del proceso de microfiltración la realiza un cartucho Hydronix SPC-25-2010, éste es un filtro plisado, que es lavable y reusable, fabricado en poliéster, su tarea es retirar los sedimentos que superen 10 μ m. Los cartuchos de la serie SPC de Hydronix son resistentes a químicos y bacterias. En la figura 12 podemos ver que la eficiencia del filtro llega al 85% en partículas de 10 μ m, y es eficaz para retener partículas de menos de 5 μ m con eficiencia del 70%. La caída de presión es de 1PSI a 20GPM.

Figura 12. Filtro plisado Hydronix, porcentaje de eficiencia y caída de presión.

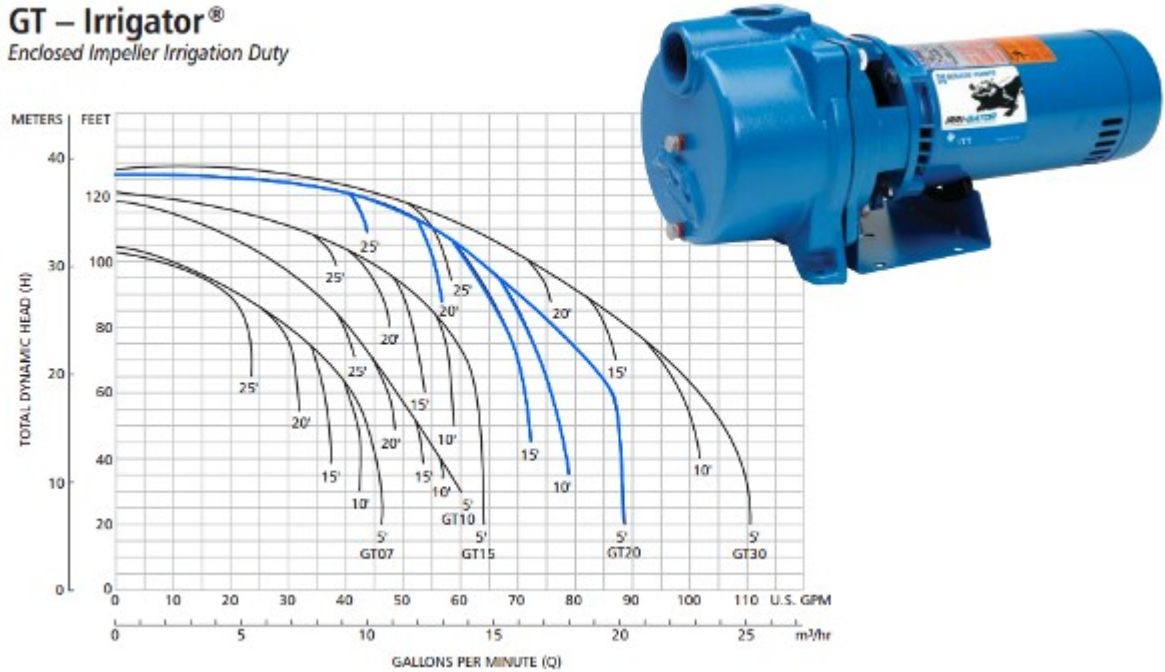


Fuente: http://www.hydronixwater.com/specs_es/SPC_es.pdf

La siguiente etapa de filtración es un cartucho de adsorción con carbón activado KX Matrikx 1 01-425-125-20 que proporciona un completo control de químicos, olores y partículas de un diámetro nominal de 6 μ m. La vida útil de este filtro es de 570 m³, el porcentaje de remoción de partículas de 6 μ m llega al 85% según datos del fabricante. Diferencial de presión para este filtro es de 8.5PSI a 15 L/min. La vida útil no se puede estimar fácilmente pero se espera que dure más de 6 meses.

Para mover el agua del proceso se emplea una bomba centrífuga “GT 20–Irrigator” de 2HP, esta tiene una capacidad de 80GPM y una presión de trabajo normal entre 20 y 40PSI y una presión de trabajo máxima de 120PSI, este equipo puede configurarse para lograr las presiones y flujos requeridos. En la Figura 13 podemos ver las curvas de prestación de la bomba.

Figura 13. Curvas y datos de prestación de bomba GT20 Irrigator.



Fuente: <http://www.glauber.com/Products/Pumps/GouldsPumps/goulds/goulds>

4.2.1.3.3 Desinfección por Ultravioleta (UV)

La desinfección es el procedimiento final para el agua tratada, ya que se tiene una buena retención de partículas con el tren de filtros, se emplea la desinfección por UV que es un proceso de bajo consumo de energía y muy eficiente para eliminar patógenos. La desinfección estaría dada por un equipo de desinfección UV marca Watts referencia “HSUV-SS-8-1” con un flujo máximo de 8GPM. El tratamiento finaliza con el agua almacenada en el tanque recolector con capacidad de 1000L. En la Tabla 17 se pueden ver los diferentes porcentajes de remoción presentados por diferentes autores en la literatura, con sistemas de microfiltración.

Tabla 17. Comparación porcentaje de remoción microfiltración.

ARTICULO	DBO5 (mg/L) Remoción %	SS (mg/L) Remoción %	CT (cfu/100 mL) Remoción %
Gerba et al., 1995 [35]	-	58	98
Langlais, et al., 1992 [50]	70	99	-
Hart et al., 1990 [51]	70	-	-
VALORACIÓN	P^c	P^c	B^b

^a Muy Bueno, ^b Bueno, ^c Promedio, ^d Malo, ^e Muy Malo

4.2.1.3.4 Cálculo consumo de la solución 3 por m³

El cálculo del consumo eléctrico para tratar 1m³ de agua con la solución 3, se realiza sumando los consumos de la bomba de 2HP (W_b), y el consumo del equipo de desinfección UV (W_{uv}), a continuación se calcula el consumo total de la solución 3:

Características de la bomba (W_b):

- Caudal: 1.8 m³/h
- Potencia: 1600 W (2HP).
- Voltaje: 110 V, 60 Hz.

$$W_b = \frac{1600W/h}{\frac{1.8m^3}{1h}} = 888.9W/m^3$$

Características del generador eléctrico (W_{uv}):

- Tiempo: 0.56h
- Potencia: 8 W
- Voltaje: 110 V, 60 Hz.

$$W_e = \frac{8W/h}{\frac{1m^3}{0.56h}} = 4.44W/m^3$$

El consumo eléctrico de la solución 2 (W_{s2}) es:

$$W_{s3} = W_b + W_{uv} = 888.9 + 4.44 = 893.3W/m^3$$

La Tabla 22 muestra el resumen de todos los criterios seleccionados para la evaluación de la solución 3 “Filtro percolador, de Partículas, Microfiltración, Adsorción con carbón activado y Desinfección UV”, los cuales serán los datos de entrada para el software Visual PROMETHEE.

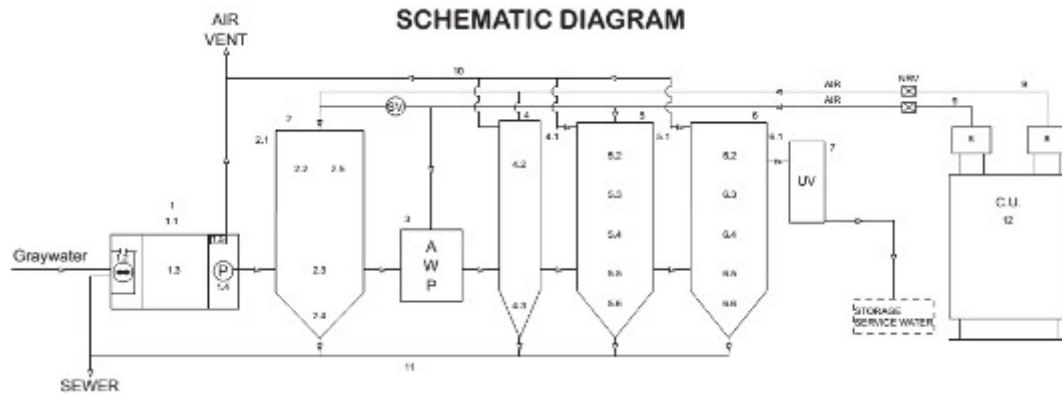
4.2.1.4 Solución 4: Sistema Aqua2use GWTS 1200

La empresa Aqua2use ofrece un producto comercial de tratamiento de aguas grises, completamente automático y que ofrece un agua tratada de buena calidad, con remociones de DBO, DQO y SS superiores del 95%, este equipo tiene capacidad para tratar 1200L diarios y es autolimpiable, requiere poco mantenimiento y consume 2kW/m³. Los equipos ofrecidos por esta empresa taiwanesa, pueden verse en su página web www.aqua2use.com/. A continuación se describen algunas de sus características:

- a. **Pre filtro:** una filtración progresiva con el filtro mataala, que paso a paso, primero filtra desde partículas grandes a pequeñas capturando entre el 60 y el 90% de sólidos suspendidos.
- b. **Cámara reguladora / lodos activos / decantado:** el flujo de agua gris para tratamiento es irregular en el sistema, experimenta un pico en la mañana y otro en la tarde. El flujo irregular es captado por el tanque de regulación con el fin de asegurar un flujo regular a la próxima sección del sistema de tratamiento. Simultáneamente la cámara de regulación funciona como un tanque de lodos activos con un decantador integrado, eyector de espuma y purga de sedimentos y lodos.
- c. **Segundo proceso de sedimentación:** este tanque aumenta la sedimentación orgánica que es producida durante la etapa de lodos activos.
- d. **Dos secciones de tratamiento biológico:** el agua atraviesa dos etapas de bio-filtros progresivos mataala, el bio-filtro secundario es resistente a cargas abruptas. Un soplador de aire en espiral limpia periódicamente el bio-filtro mataala de los floculos atrapados, esta característica de limpieza puede ser auto programada.
- e. **Desinfección UV:** después de las dos etapas de tratamiento biológico, el agua fluye a través de una cámara de acero inoxidable hacia un sistema de desinfección de UV-C.
- f. **Drenaje:** Cada cámara tiene su propio colector y purga de lodos, el lodo concentrado y los sedimentos son dispuestos a través de la cámara de drenaje conectada a la alcantarilla o pozo séptico.

- g. **Panel de control:** el panel de control electrónico contiene funciones de programas y ajustes de operación, incluida el auto limpiado, el ahorro de energía y la función de alarma.

Figura 14. Esquema tratamiento con Aqua2use GWTS 1200.



Fuente: Página web [Aqua2use® GWTS](http://Aqua2use.com)

Figura 15. Equipo para tratamiento de aguas grises Aqua2use GWTS 1200.



Fuente: Página web [Aqua2use® GWTS](http://Aqua2use.com)

Este sistema consta de tres partes básicas, un equipo Aqua2use GWTS 1200, una bomba de ½ HP y un tanque colector de 1000L para el agua tratada, en la Figura 14 puede verse en esquema de tratamiento, y en la Figura 15 se ve el equipo abierto, sin la protección externa de plástico. Los datos de dimensiones, consumo eléctrico, capacidad y características del agua fueron tomados del catálogo del producto y se ven en la Tabla 18. El equipo consume 2kW/m³[52]y produce 1200L diarios de agua tratada. La empresa Aqua2use afirma que con este producto, se puede ahorrar en promedio 130m³ anualmente.

Tabla 18. Comparación porcentaje de remoción con Aqua2use GWTS 1200.

ARTICULO	DBO5 (mg/L) Remoción %	SS (mg/L) Remoción %	CT (cfu/100 mL) Remoción %
Catalogo Aqua2use [53]	99.5	95.4	99.9
VALORACIÓN	MB^a	MB^a	MB^a

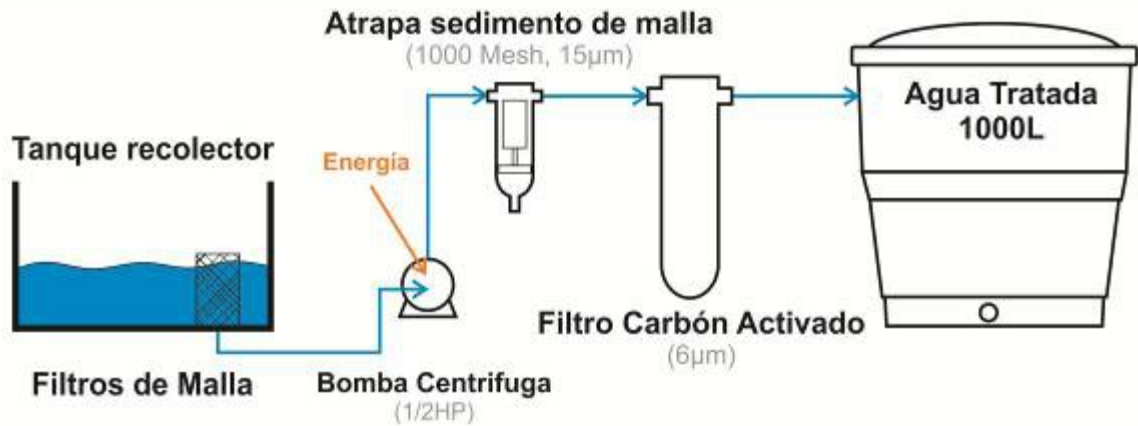
^a Muy Bueno, ^b Bueno, ^c Promedio, ^d Malo, ^e Muy Malo

4.2.2 Corriente 2: Enjuague de Envases

El consumo de agua utilizada para el proceso de enjuague, constituye cerca del 15% del total de agua usada por la empresa. Se propone que el efluente resultante del tratamiento de esta corriente se envíe a un tanque independiente del usado para almacenar las aguas tratadas del proceso de lavado (corriente 1). El agua tratada en este caso, se puede emplear tanto en la segunda etapa de lavado, como en los procesos de lavado de pisos y uso en retretes.

El proceso de depuración consta de un cribado con una rejilla fija, filtro atrapa sedimento (filtración de partículas) de malla 1000 (15µm) y finalmente un proceso de adsorción con carbón activado para la eliminación de químicos y olores. Este sistema no requiere del uso de etapa de desinfección ya que el agente usado para el lavado (biopart), es un germicida muy efectivo [54] que evita el desarrollo de bacterias y hongos, además no es tóxico para los humanos y en algunos casos se usa en agua potable sin que se vea afectada su calidad.

Figura 16. Diagrama esquemático tratamiento de primera corriente de enjuague.



El enjuague de los envases se realiza en una pileta que recoge el agua consumida para disponerla al desagüe de la empresa. Para implementar esta solución se usaría esta pileta como tanque recolector del influente. Después de instalar un filtro fijo de malla 50 para realizar el filtrado grueso, una bomba centrífuga de ½ HP para agua limpia lleva el agua del tanque recolector hacia el sistema de filtrado. Se emplea un filtro “Rusco 3/4-1000”, con una malla 1000 equivalente a 15µm. Lo particularmente bueno en el diseño del filtro es que su durabilidad es muy alta (ilimitado si se usa adecuadamente) debido a que cuando se satura el filtro se retira y se lava y está listo para ser usado de nuevo. Para mejorar las condiciones del agua resultante, el agua se pasa por un filtro de carbón activado que elimina los químicos y olores para obtener un agua de muy buena calidad. El filtro “KX Matrikx +1” con una filtración nominal de 0.6 µm, tiene una vida útil muy larga (más de 560 m³) por lo que podemos suponer que su duración va a superar el año sin necesidad de reemplazo.

4. 3 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA ADECUADA (PROMETHEE)

Las soluciones que serán evaluadas con la metodología PROMETHEE serán las propuestas para el tratamiento de la corriente 1 (aguas de la etapa 1 de lavado) en el numeral 4.2.1. Debido a las características de la corriente 2 (ya descritas), no se evaluarán alternativas para el tratamiento de ésta corriente (aguas de enjuague).

Para obtener buenos resultados al usar la metodología de PROMETHEE, es muy importante seleccionar adecuadamente cuáles son los criterios de entrada. El peso de cada parámetro es un criterio de entrada muy importante pero que a la

vez es muy subjetivo, ya que depende del evaluador asignar este valor, lo cual puede afectar el resultado. Teniendo en cuenta este factor, para asignar los pesos se trató de dar importancia a lo que la empresa requiere, que en este caso es agua de calidad aceptable para el reúso pensado, y una inversión económica lo más pequeña posible. Los pesos fueron distribuidos de la siguiente manera:

Tabla 19. Resumen corriente 2 “Enjuague de Envases”.

INSUMOS	COS^a US,	CON^b W/m ³	INS^c US\$/año	ARE^d m ²	CAP^e L/h	MAN^f mh/año*
Bomba Centrifuga ½ HP [4]**	180	154	X	0.2	X	X
Filtro Rusco 3/4-1000-F 1000 [13]	151	X	X	X	X	X
Filtro Carbón Activado [20]	128	X	150	X	700	1
Carcasa para filtro [19]	128.6	X	X	X	X	X
Tanque 1000Lit. [8]	140	X	X	2	X	X

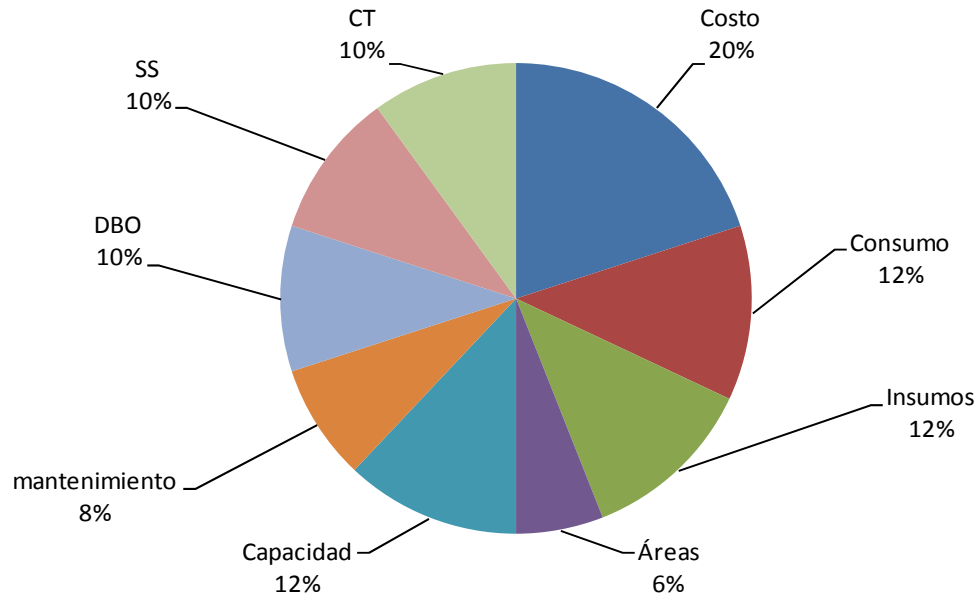
^a Costo del insumo, ^b Consumo eléctrico, ^c Insumos necesarios, ^d Área ocupada, ^e Capacidad de tratamiento,

^f Mantenimiento anual, * horas hombre al año, ** cotizaciones anexo 3

- Calidad de agua: se le asignó un peso del 30% total, distribuido en partes iguales entre la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Sólidos Suspendidos (SS) y Coliformes Totales (CT), que muestran en resumen cual es la condición general del agua tratada. El peso de este criterio es significativo porque casi es la tercera parte del total evaluado.
- Costos fijos y de operación para el tratamiento del agua: se le asignó un peso del 44% del peso total, distribuido en el valor de la inversión inicial (Costo 20%), el consumo eléctrico que requiere el equipamiento (Consumo 12%), y los insumos necesarios para su funcionamiento durante un año (insumos 12%).
- Capacidad de la solución propuesta para producir el agua tratada: se midió esta característica en litros por hora (peso 12%).
- Área (m²) ocupada por la solución propuesta: se le asignó un peso del 6%.
- Mantenimiento de los equipos para su buen funcionamiento: se le asignó un peso del 8%.

La distribución de los pesos se muestra en el gráfico 3.

Gráfico 3. Distribución de pesos de los criterios de selección.



Otro factor que afecta el resultado obtenido mediante la metodología PROMETHEE es el criterio de preferencia (los criterios de preferencia se describen en el apartado 2.2.1). En el caso de los factores costo, consumo, insumos, área, capacidad y mantenimiento, se emplea la función en forma de V o criterio de preferencia tipo III. Los valores de referencia para el software están en el intervalo de los valores máximos y mínimos que se ingresan por criterio. Para los criterios de calidad de agua DBO, SS, CT, se usa la función de preferencia tipo escalonada o criterio de preferencia tipo IV, en esta selección se usa un método cualitativo que valora de mejor a peor cada criterio con la siguiente nomenclatura MB (muy bueno), B (bueno), P (promedio), M (malo) y MM (muy malo), esta ponderación se realiza de esta manera debido a la calidad de la información recolectada, ya que no son una representación exacta de los resultados que puede obtener la solución evaluada. Debido a esto se toman como criterios de decisión la estimación cualitativa del resultado que se espera obtener con la solución, dividida en 5 niveles.

Para simplificar la representación de las alternativas se les dieron nombres cortos que las representan. Los nombres seleccionados son:

- Solución 1:** Filtro Percolador, Filtro de Arena, Sedimentador y Ozono
Solución 2: Filtro percolador, Electrocoagulación, Sedimentador y UV
Solución 3: Filtro Percolador, de Partículas, Microfiltración, Adsorción con Carbón Activado y Desinfección UV
Solución 4: Sistema Aqua2use GWTS 1200

Se muestra a continuación un consolidado de los costos, consumos, insumos, área ocupada, capacidad, mantenimiento, remoción de DBO, de SS y de coliformes totales. Estos se realizan para cada una de las 4 alternativas.

Tabla 20. Resumen solución 1 “Filtro Percolador, Filtro de Arena, Sedimentador y Ozono”.

INSUMOS	COS^a US\$	CON^b W/m ³	INS^c US\$/año	ARE^d m ²	CAP^e L/h	MAN^f mh/año*	DBO^g	SS^h	CTⁱ
Filtro Aqua2use UG GWDD [1]**	991	33.3	X	0.24	X	6	-	-	-
(3) Tanques 500L [2]	231	X	X	3	450	X	X	X	X
(1500kg) Arena para filtrado [3]	168	X	45	X	X	4	MB	B	MB
Bomba Centrifuga ½ HP [4]	180	166.7	X	0.2	X	X	X	X	X
Filtro Rusco 100ST-F [5]	148	X	X	X	X	1	X	X	X
Ozonificador Eclipse II [6]	1094	8.33	X	X	X	X	-	-	-
Inyector de ozono [7]	277	X	X	X	X	X	X	X	X
Tanque 1000Lit. [8]	140	X	X	2	X	X	X	X	X

^a Costo del insumo, ^b Consumo eléctrico, ^c Insumos necesarios, ^d Área ocupada, ^e Capacidad de tratamiento, ^f Mantenimiento anual, ^g Demanda biológica de oxígeno, ^h Sólidos suspendidos, ⁱ Coliformes totales, * horas hombre al año, ** cotizaciones anexo 3

Tabla 21. Resumen solución 2 “Filtro percolador, Electrocoagulación, Sedimentador y UV”.

INSUMOS	COS^a US\$	CON^b W/m ³	INS^c US\$/año	ARE^d m ²	CAP^e L/h	MAN^f mh/año*	DBO^g	SS^h	CTⁱ
Filtro Aqua2use UG GWDD ^{1**}	991	33.3	X	0.24	X	6	-	-	-
Tanque 500Lit. ²	77	X	X	1	X	X	X	X	X
Bomba Sumergible ½ HP ⁹	140	70	X	X	X	X	X	X	X
Bomba Centrifuga ¾HP ⁴	180	600	X	0.2	X	X	X	X	X
Generador Eléctrico ¹⁰	417	800	X	0.2	500	136	X	X	X
Electrodos ¹¹	250	X	40	-	X	4	B	B	MB
Caja eléctrica ¹²	450	X	X	X	X	X	X	X	X
Filtro Rusco 3/4-1000-F 1000 ¹³	151	X	X	X	X	X	-	-	-
Desinfección UV ¹⁴	319	1.6	13	X	X	X	-	-	-
Tanque 1000Lit. ⁸	140	X	X	2	X	X	X	X	X

^a Costo del insumo, ^b Consumo eléctrico, ^c Insumos necesarios, ^d Área ocupada, ^e Capacidad de tratamiento, ^f Mantenimiento anual, ^g Demanda biológica de oxígeno, ^h Sólidos suspendidos, ⁱ Coliformes totales, * horas hombre al año, ** cotizaciones anexo 3

Tabla 22. Resumen solución 3 “Filtro Percolador, de Partículas, Microfiltración, Adsorción con Carbón Activado y Desinfección UV”.

INSUMOS	COS^a US\$	CON^b W/m ³	INS^c US\$/año	ARE^d m ²	CAP^e L/h	MAN^f mh/año*	DBO^g	SS^h	CTⁱ
Filtro Aqua2use GWDD ^{15**}	582	X	X	0.24	X	6	-	-	-
Interruptor flotador ¹⁶	82	X	X	X	X	X	X	X	X
Bomba Centrifuga 2 HP ¹⁶	796	888.9	X	X	X	X	X	X	X
Filtro Rusco 100ST-F ⁵	147.5	X	X	X	X	1	X	X	X
Filtro Rusco 500ST-F ¹¹	147.5	X	X	X	X	1	X	X	X
Filtro 10 µm ¹⁸	33.9	X	135.6	X	X	1	X	X	X
Carcasa para filtro ¹⁹	128.6	X	X	X	X	X	X	X	X
Filtro Carbón Activado ²⁰	128	X	90	X	700	1	P	P	B
Carcasa para filtro ¹⁹	128.6	X	X	X	X	X	X	X	X
(4) Manómetro ²⁰	64	X	X	X	X	X	X	X	X
Desinfección UV ¹⁴	319	4.4	13	X	X	X	-	-	-
Tanque 1000Lit. ⁸	140	X	X	2	X	X	X	X	X

^a Costo del insumo, ^b Consumo eléctrico, ^c Insumos necesarios, ^d Área ocupada, ^e Capacidad de tratamiento,

^f Mantenimiento anual, ^g Demanda biológica de oxígeno, ^h Sólidos suspendidos, ⁱ Coliformes totales, * horas hombre al año, ** cotizaciones anexo 3

Tabla 23. Resumen solución 4 “Sistema Aqua2use GWTS 1200”.

INSUMOS	COS^a US\$	CON^b W/m ³	INS^c US\$/año	ARE^d m ²	CAP^e L/h	MAN^f mh/año*	DBO^g	SS^h	CTⁱ
Bomba Centrifuga ½ HP 4**	180	154	X	0.2	X	X	X	X	X
aqua2use ²²	13,580	2,000	X	1.24	50	12	MB	MB	MB
Tanque 1000Lit. ⁸	140	X	X	2	X	X	X	X	X

^a Costo del insumo, ^b Consumo eléctrico, ^c Insumos necesarios, ^d Área ocupada, ^e Capacidad de tratamiento,

^f Mantenimiento anual, ^g Demanda biológica de oxígeno, ^h Sólidos suspendidos, ⁱ Coliformes totales, * horas hombre al año, ** cotizaciones anexo 3

4.3.1 Resultados del Software Visula PROMETHEE

De las Tablas 16, 18, 20 y 22 se tomaron los datos de entrada para el software, los cuales se resumen y presentan en la Tabla 24.

Tabla 24. Matriz de evaluación de los equipos seleccionados para compararse.

Escenario Bodegas del Cañizal									
Criterios Evaluados	Costo	Consumo	Insumos	Área	Capacidad	Mantenimiento	DBO	SS	CT
	US\$	W/m ³	US\$/año	m ²	L/h	mh/año	5N	5N	5N
Solución 1	3229	216.8	45.00	5.44	450.00	10	MB	B	MB
Solución 2	3115	1504.9	53.00	3.44	500.00	146	B	B	MB
Solución 3	2697.1	893.3	238.60	2.24	700.00	10	P	P	B
Solución 4	13900	2154.0	0.00	3.44	50.00	12	MB	MB	MB
Función de preferencia	Tipo III	Tipo III	Tipo III	Tipo III	Tipo III	Tipo III	Tipo IV	Tipo IV	Tipo IV

El propósito de este proyecto no es explicar en detalle la metodología PROMETHEE, información más detallada del método se puede revisar por ejemplo en [55–57]. Solo se va a comentar los resultados obtenidos con el software Visual PROMETHEE en la decisión de tecnologías de tratamiento de aguas de desecho, de la corriente 1.

PROMETHEE realiza una clasificación completa de mejor a peor alternativa de tratamiento de aguas, desde el punto de vista de las calificaciones de los diferentes criterios. El gráfico 4 muestra claramente que la alternativa “Solución 3” domina a las otras. El sistema de filtro percolador, de partículas, microfiltración, adsorción con carbón activado y desinfección UV, se ve como la mejor opción de acuerdo a la distribución de pesos que se seleccionó. La metodología PROMETHEE, considera en este caso un problema con 4 acciones (soluciones 1, 2, 3 y 4) que tiene 9 criterios (costo, consumo, insumos, área, capacidad, mantenimiento, DBO, DQO y CT), dependiendo de las características de cada criterio, éste puede ser maximizado o minimizado, los criterios minimizados son; costo, consumo, insumos, área y mantenimiento. Los criterios maximizados son; capacidad, DBO, DQO y CT.

El decisor expresa las preferencias de una acción sobre otra computando cada criterio de preferencia y el valor de esta preferencia es un valor entre 0 y 1. Dependiendo del tipo de gráfico de preferencia seleccionado estos valores cambian. El resultado se puede ver como un flujo positivo Φ^+ que representa la preferencia de la acción sobre todos los criterios y un flujo negativo Φ^- , esta puntuación representa la debilidad en la comparación [58].

En el Gráfico 5 se ve la clasificación y los pesos asignados a cada criterio y la representación de los valores Φ (Φ es igual a la suma de Φ^+ y Φ^-) que indica el grado de preferencia de una alternativa o acción sobre las otras. El software tiene una herramienta llamada “WalkingWeights” (paseando por los pesos) que permite variar el valor de los pesos elegido por el decisor y con esto verificar la incidencia que puede tener la variación de uno de los pesos en la clasificación final que suministra el software. Esta herramienta permite evaluar la sensibilidad de la solución planteada, ya que si al hacer pequeñas variaciones en los valores de pesos de los criterios, el resultado cambia de manera importante, quiere decir que la incertidumbre de la solución es alta.

El Gráfico 4, muestra la representación Diamante de PROMETHEE, es una alternativa de dos dimensiones que une las calificaciones de PROMETHEE I y II. El cuadrado corresponde al plano de las acciones positivas y negativas de Φ^+ y Φ^- . El plano tiene un ángulo de 45° de manera que la dimensión vertical proporciona el flujo neto Φ . Φ^+ incrementa la puntuación desde la izquierda a la esquina superior y la puntuación de Φ^- aumenta desde la izquierda a la esquina inferior. Para cada acción, se grafica un cono en la posición de acción en el plano.

Si evaluamos el gráfico podemos ver que la solución 1, es una solución viable, ya que su flujo neto Φ es positivo también, pero la referencia está dada a la solución 3 porque su flujo neto es superior. Estas dos alternativas son viables, comparadas con las otras, y representan las mejores opciones a elegir teniendo en cuenta los datos que se ingresaron al software.

Gráfico 4. Clasificación PROMETHEE I.

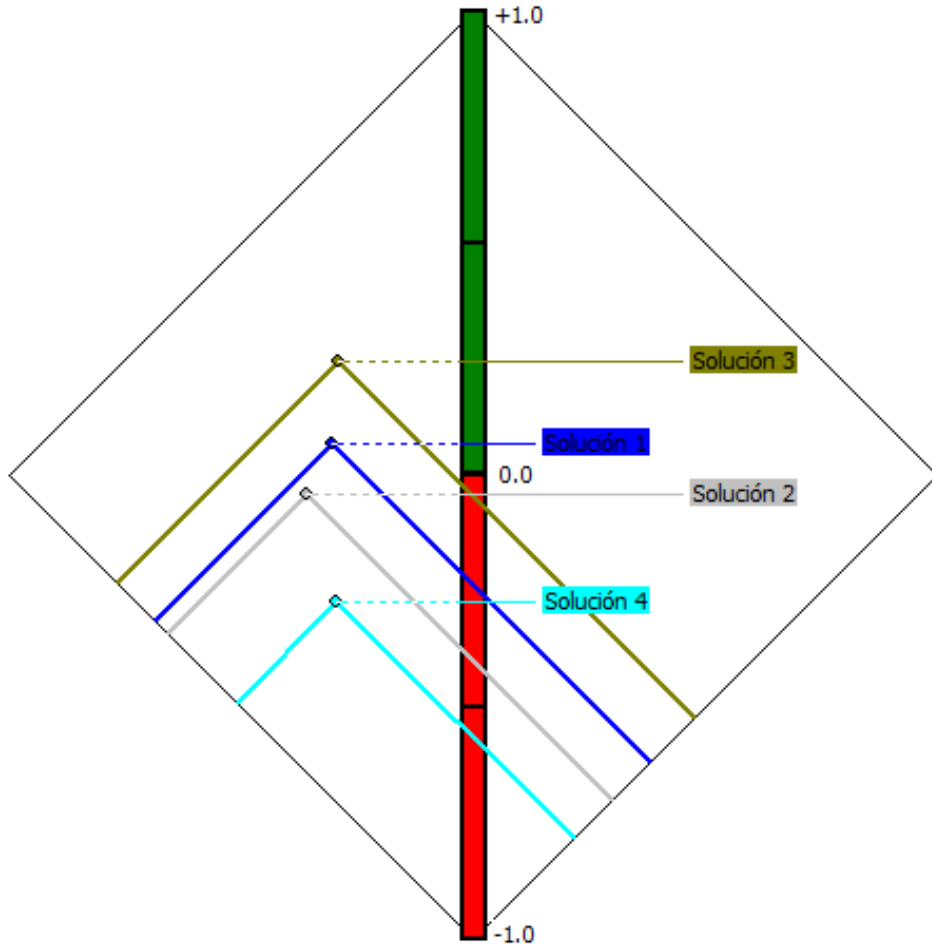
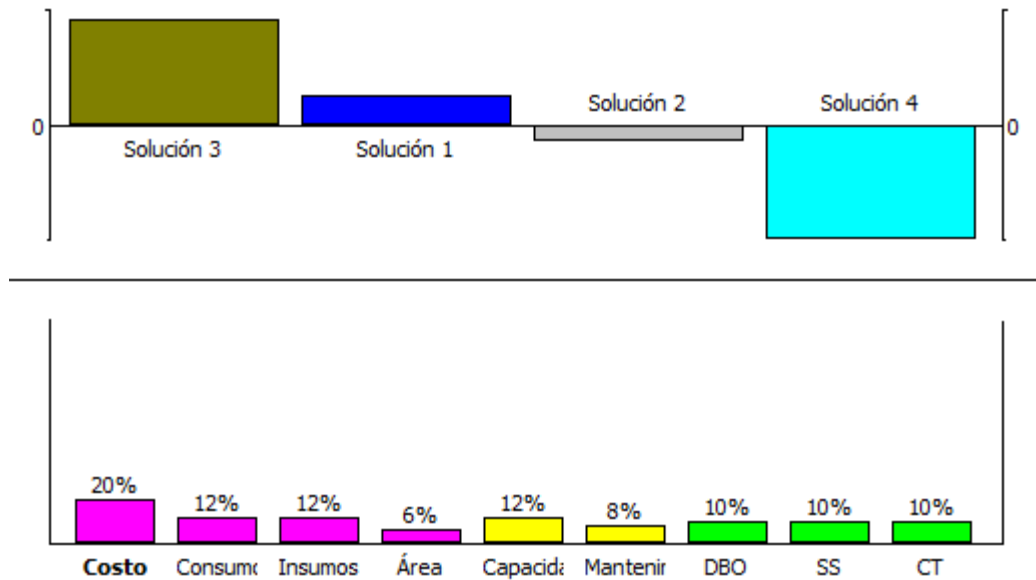


Gráfico 5. Clasificación de alternativas con herramienta “Walking Weights”.



PROMETHEE calcula flujos de preferencias positivas y negativas, los flujos positivos expresan que tanto domina la alternativa a las otras y el flujo negativo que tanto es dominada. En el resultado para este proyecto se ve que los flujos que ayudan a que se seleccione la “Solución 3” son costo, capacidad, mantenimiento, área y consumo y los que suman negativamente son SS insumos y DBO. El vector PI muestra la dirección de compromiso que deben tener las soluciones de acuerdo a los pesos aplicados, en el Gráfico 6 se ve gráficamente como los pesos resultantes de la comparaciones Phi están distribuidos en las diferentes alternativas, también discrimina cuales están por encima de cero y cuales por debajo (si están por encima de cero quiere decir que son preferibles y aumentan el valor total de Phi y si están por debajo de cero quiere decir que son defectos o cualidades no deseadas que restan a la puntuación final de la propuesta), lo que muestra cuales de los criterios benefician la propuesta y cuáles no. Los resultados de comparaciones de Phi se muestran también en la tabla 25.

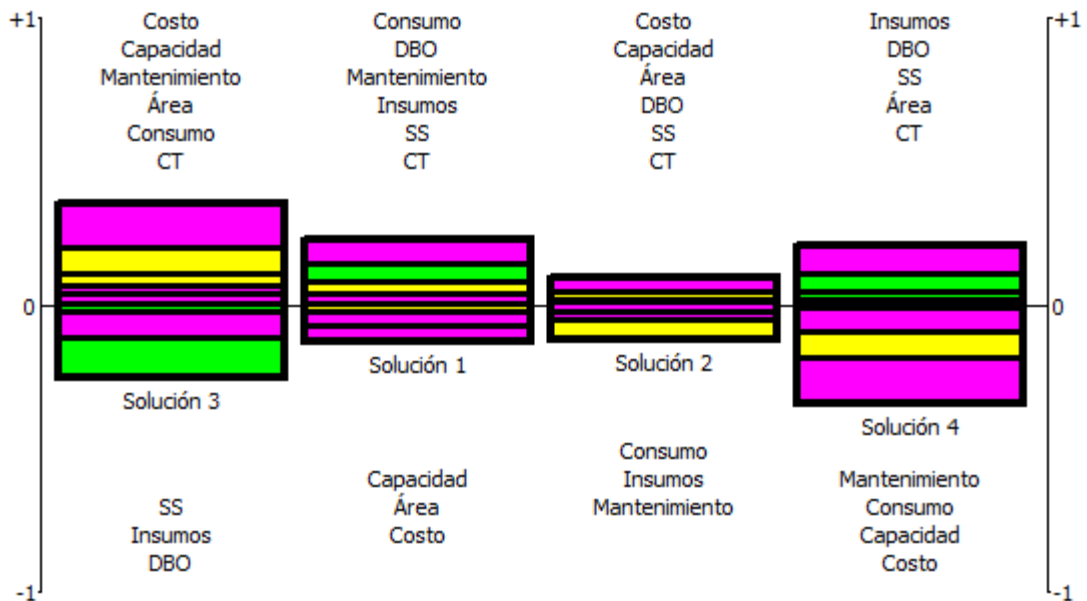
Debido a la gran importancia del factor del peso de cada criterio, se realizó una evaluación con ayuda del gráfico “Walking Weights” para evaluar como se ve afectada la preferencia si se varía el peso de un criterio y se disminuye proporcionalmente el peso de los otros. El resultado es que en el caso de la solución 3 el peso del criterio que más afecta su resultado es el de insumos. Si el peso de este criterio se aumenta, su prevalencia decrece considerablemente hasta

hacerse inviable y finalmente predomina la solución 1 como opción más adecuada, pero tendría que subir el peso del criterio insumos a 23% para llegar a esta instancia. La DBO y SS también afectan el resultado, pero para lograr disminuir su prevalencia, la suma de DBO y SS debería superar el 38%.

Tabla 25. Flujo de preferencias.

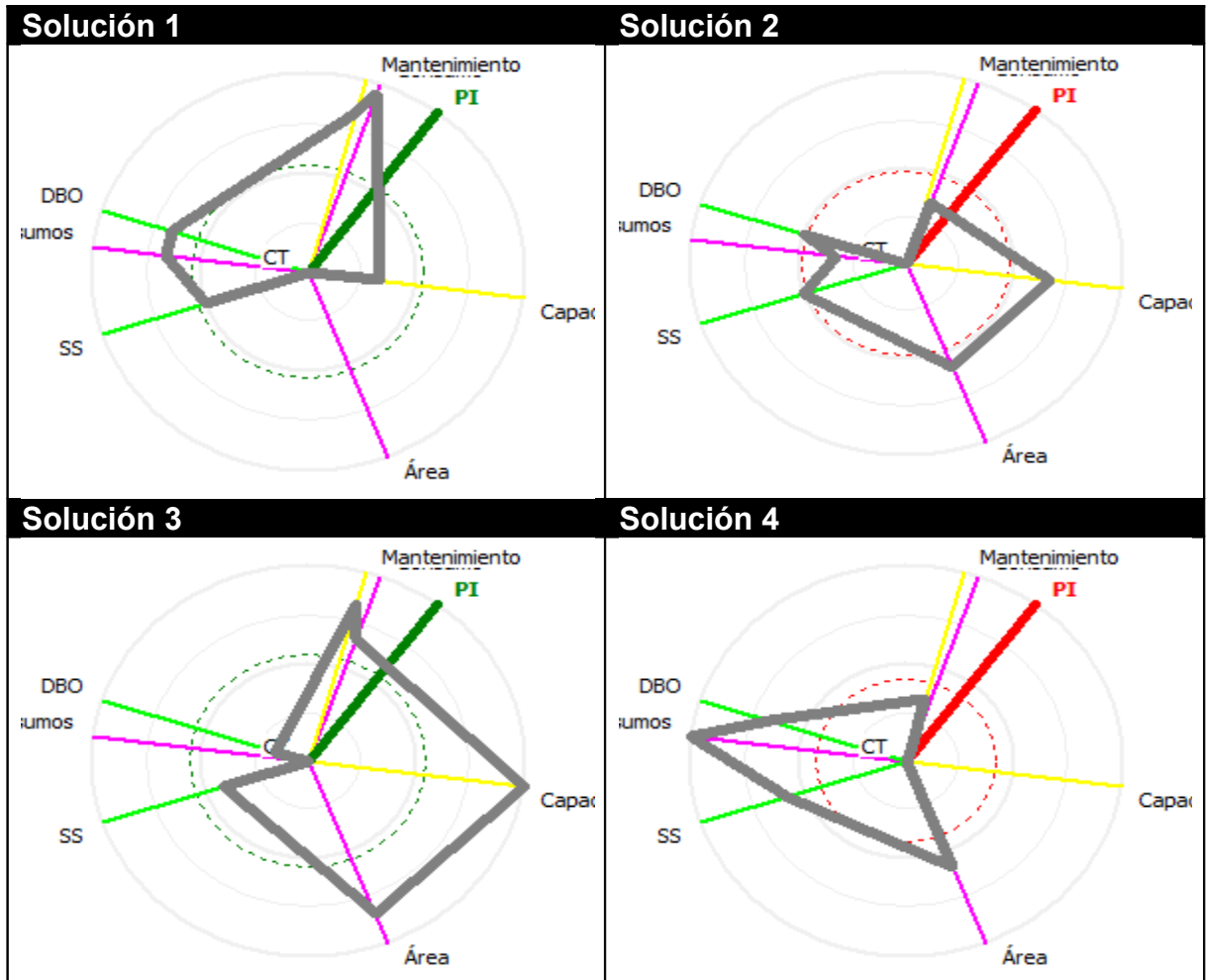
Flujo Multicriterio	Phi	Phi+	Phi-
Solución 3	0.2474	0.4778	0.2304
Solución 1	0.0671	0.3804	0.3133
Solución 2	-0.0418	0.2993	0.3411
Solución 4	-0.2726	0.2167	0.4893

Gráfico 6. Diagrama computado de Phi.



La ventana red GAIA muestra una representación gráfica de los resultados de criterios únicos de flujo neto de la acción seleccionada. En el gráfico se muestra los vectores de cada criterio y su distribución. También está representado el vector PI, en la red que se forma, cada distancia radial corresponde a la puntuación del flujo neto Phi. La red GAIA de cada alternativa es mostrada en la tabla 26, el vector PI se muestra en cada gráfica y se ve hacia dónde debe dirigirse el gráfico para obtener el resultado más favorecedor.

Tabla 26. Red GAIA.



4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos podemos ver que existe un consumo muy importante de agua del acueducto en la etapa de lavado y enjuague de envases, los cuales juntos representan el 50% del agua total consumida por la empresa. La preparación del producto consume una cuarta parte del agua y el 25% restante se gasta en consumos operativos como el lavado de áreas de trabajo y usos generales. Si se realizara sólo el tratamiento para el agua producida en la etapa de enjuague de los envases y se reutilizara en la etapa de lavado, se podría reducir el consumo de agua en la etapa de lavado de un 35.5% a un 20.7% con lo que se podría ahorrar anualmente casi 100m³ de agua proveniente del AMB.

Para el tratamiento de las aguas de lavado en la corriente 1, el software posicionó como mejor alternativa al sistema de la solución 3: filtro percolador, de partículas, microfiltración, adsorción con carbón activado y desinfección UV, proponiéndolo como el más adecuado para implementar en la empresa. Este resultado es válido para las condiciones específicas de cantidad de efluente, costo de la intervención y parámetros de selección, al comparar cuatro alternativas. El software Visual PROMETHEE, indica que este sistema fue el que mejor resultado probable puede ofrecer como alternativa de solución para la empresa.

La calidad de agua resultado del proceso de tratamiento de la solución 3 se estima a partir de los elementos que participan en la solución. Según los datos del fabricante del filtro percolador, la remoción que se puede lograr en DBO, DQO, SS es del 50, 65 y 80% respectivamente, por lo que podemos suponer que el agua después del filtro mataala de Aqua2use tendrá una DBO 162mg/L – DQO 191.1mg/L – SS 18.95 mg/L. En el artículo de [59], se desarrolla un experimento de tratamiento de aguas grises por filtración con un filtro de malla de 130 μ m y 25 μ m, y desinfección con UV. Los resultados de este estudio presentan una remoción promedio en DBO, DQO, SS de 65, 47 y 59% respectivamente para el filtro de 130 μ m y DBO, DQO, SS de 61, 72 y 82% respectivamente para el filtro de 25 μ m [59]. Partiendo como referencia de los datos ofrecidos en el artículo anteriormente mencionado se espera que el resultado del efluente tenga concentraciones menores a DBO 22mg/L – DQO 28mg/L – SS 1,4 mg/L, con la etapa de filtración de partículas de 152 μ m y 30 μ m. Para lograr la calidad de agua deseada, se usa la microfiltración y adsorción con carbón activado que tienen un tamaño de corte de 10 μ m y 6 μ m respectivamente. La adsorción con carbón activado ofrece un efectivo tratamiento de aguas de desecho para remover constituyentes orgánicos y biodegradables, este puede reducir los niveles de DBO y DQO entre 0.1 y 5 mg/L [60], El mecanismo básico de la eliminación es por adsorción de los compuestos orgánicos en el carbono.

La calidad del agua tratada resultante es de uso industrial, y puede ser empleada en la primera etapa del proceso de lavado de envases o usos generales como descarga de retretes o lavado de pisos. El reúso de aguas grises para aplicaciones no potables como el vaciado de retretes puede reducir sustancialmente el consumo de agua potable pero debe tenerse en cuenta una adecuada desinfección para evitar riesgos de infección para el usuario final, por patógenos presentes en el agua, aunque el riesgo es bajo. En la empresa se pueden ahorrar más de 4m³ mensuales (ver Tabla 10) usando el agua reciclada del proceso de lavado de envases y así evitar el gasto de agua potable, que está

sobre calificado para este fin. La cantidad de agua ahorrada podría aumentar si se considera el uso de agua gris tratada para el lavado de pisos. Otro uso posible es la reinyección de agua gris tratada para la primera etapa del lavado de envase ya que la calidad lograda es adecuada para este fin, lo que ahorraría agua que en el caso del lavado llega a superar el 17% del total del agua usada.

La tecnología de la solución 3 (Filtro Percolador, de Partículas, Microfiltración, Adsorción con Carbón Activado y Desinfección UV) para el tratamiento de aguas de lavado es robusta y puede manejar varias concentraciones de contaminantes orgánicos y patógenos en el efluente de agua gris y consistentemente produce un efluente con una calidad apropiada y segura que satisface los estándares propuestos para su reúso. El agua tratada resultado del proceso de recuperación, no sería adecuada para el enjuague de envases ni para el lavado de equipos ya que se exige agua potable para estas actividades. Es posible conseguir agua potable con procesos adicionales en las tecnologías propuestas, pero la inversión que implica garantizar su potabilidad no hace viable su desarrollo (Resolución número 2115 DE 2007, Capítulo V Cuadro N°. 11 y 12).

La corriente 2, de enjuague de envases, es la que requiere menor cantidad de intervención para su tratamiento, con la implementación de un sistema de cribado, filtración de partículas y adsorción con carbón activado, se consigue un efluente de buena calidad que puede reintroducirse a la etapa de lavado y que ahorraría una cantidad importante de agua del AMB.

4.4 ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

Los gastos de instalación de equipos, adecuación de espacios y tuberías no se tuvieron en cuenta para el criterio de costos en el software Visual PROMETHEE. Para realizar el balance económico del sistema se estimará que la instalación es en el área de lavado y la recepción del agua se realizará justo encima del área donde se recolecta el agua de desecho, en el segundo piso de la empresa.

4.4.1 Lavado de Envases Corriente 1

Para la corriente 1 de lavado se estima que en el año se ahorre el 33% del total de agua consumida, por lo que el ahorro anual, tomando los datos históricos de 2012, sería de 216.8m³ de agua del acueducto, con un costo de COP \$735,904.5 (US\$408) anuales. Se debe tener en cuenta que para funcionar, se requieren tres

cartuchos de microfiltración de 10µm (este número puede ser menor ya que los filtros son lavables) y un filtro de carbón activado de 6 µm que tendrían un costo total de US\$212.35 (US\$ 84.9 filtro de carbón, US\$51.15 tres filtros de 10µm US\$13.3 impuestos de filtros y US\$63 transporte a Colombia). Como la vida útil de la bombilla UV es de 4 años solo se le suman US\$13 a este ítem y el valor del consumo eléctrico para producir el agua tratada que sería de COP \$65,960.00 (US\$37), ya que consume 194kW (precio de luz 340\$/Kwh). Finalmente se ahorraría en un año de proceso US\$121.65 y el precio por m³ de agua tratada es de US\$1.32/m³ (COP \$2,500). En la tabla 27 se puede ver el detalle de los gastos.

Tabla 27. Resumen de gastos anuales de insumos corriente 1.

Elemento	Nota	Costo anual US\$
Energía	Motobomba consume 194kW/año	37
Trabajo	Diez horas de trabajo anual	24
(3) Cartuchos 10µm	cartuchos de microfiltración de 10µm,	51.15
(1) Cartucho de carbón de 6 µm	filtro de carbón activado	84.9
(1) Bombilla UV	bombilla UV fracción de vida útil	13
Impuestos importados		13.3
Trasporte importaciones		63
	TOTAL	286,35

La inversión en materiales para tratar el agua de esta corriente sería de US\$2,610.1, se estima que la instalación de tuberías y accesorios es de US\$40, más el gasto de US\$50 para un técnico que instale la solución en la planta de producción, por lo que el total de la inversión sería de US\$2,700.1 Teniendo en cuenta una tasa de descuento del 3.5% anual esta inversión tiene una TIR de 3,66% con un periodo de recuperación de la inversión de 30 años.

4.4.2 Enjuague de Envases Corriente 2

Para estimar el agua ahorrada en la corriente 1 de enjuague, se estima que en el año se ahorre el 12% del total de agua consumida. Esto se debe a las pérdidas por salpicaduras, la retención y otros factores, por lo que el ahorro anual, tomando

los datos históricos de 2012, sería de 78.8 m³ de agua del acueducto, con un costo de COP \$276,942.3 (US\$146) anuales. Se debe tener en cuenta que para el funcionamiento de la alternativa de tratamiento propuesta, el equipo requiere un filtro de carbón activado de US\$128, con una duración de 284m³ de agua filtrada (la vida útil se reduce a la mitad, teniendo en cuenta que no es agua potable). El costo por año del filtro sería de US\$35.6 y el consumo de la motobomba de ½ HP para producir el agua tratada, sería de 12.1 kW que cuestan COP \$4,130 (US\$2.3). Tomando un costo de kW/h de COP \$340, el ahorro anual sería de US\$60.1 y el precio por m³ de agua tratada es de US\$1/m³ (COP \$1850). En la tabla 28 se ve un resumen de los gastos operativos para la solución de la corriente 2.

Tabla 28. Resumen de gastos anuales en insumos corriente 2.

Elemento	Nota	Costo anual US\$
Energía	Motobomba consume 12kW/año	2.3
Trabajo	Cinco horas de trabajo anual	12
(1) Cartucho de carbón de 6 µm	filtro de carbón activado	28.3
Impuestos importados		13.3
Trasporte importaciones		30
	TOTAL	85.9

La inversión en materiales para tratar el agua de esta corriente sería de US\$727,6, se estima que la instalación de tuberías y accesorios es de US\$40, más el gasto de un técnico para la instalación US\$50, por lo que el total de la inversión sería de US\$817,6. Esta inversión tiene una TIR de 7.9%, con lo cual la inversión podría recuperarse en 6 años.

5. CONCLUSIONES

- El uso de agua recuperada con procesos de tratamientos de aguas de desecho ofrece un potencial para sustituir las fuentes de agua potable para uso industrial, en especial si se reglamenta la ley 373 de 1997.
- Los beneficios que se pueden obtener con la implementación de procesos de tratamiento en la empresa son la reducción en volumen del agua potable consumida, el cual se estima entre el 12 y 33% en el lavado y el enjuague respectivamente. También se reduce el volumen de agua desechada en el desagüe municipal que debe ser tratada posteriormente. La empresa podrá ver inmediatamente la reducción de sus gastos de agua, pero la recuperación de la inversión inicial sería muy larga.
- La solución para la corriente 2 es económicamente viable y ya que la inversión puede recuperarse en un periodo de 6 años o menos. La solución para la corriente 1 no puede recuperarse en un periodo de tiempo adecuado, por lo que no es viable.
- El proyecto muestra que la metodología PROMETHEE para la toma de decisiones es una alternativa interesante cuando se presentan múltiples alternativas viables, por lo que usando la metodología multicriterio se hace más objetiva la decisión final.
- Debido al bajo costo del agua ofrecido por el AMB y al bajo consumo, cualquier solución para tratamiento tiene periodos de retorno de la inversión muy altos, en el caso de las soluciones comerciales con costos entre US\$13,000 y US\$25,000, se puede ver que los productos que ofrecen estas empresas para tratar las aguas de desecho son difícilmente aplicables a Colombia, en especial en pequeñas empresas ya que la inversión inicial es muy alta y no se podría amortizar su compra.

6. RECOMENDACIONES

- Para conocer los consumos reales de las corrientes 1 y 2, lo recomendable es instalar medidores puntuales que pueden dar un dato de consumo con menor incertidumbre.
- Es importante que la empresa implemente un programa de producción más limpia, que genere planes y estrategias para el uso más racional del agua. La implementación de este programa puede generar ahorros importantes para la empresa y se complementa con la solución de tratamiento de aguas planteada en este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. UNFPA. *Estado de la Poblacion Mundial Informe 2011 / State of World Population Report 2011*. S.I.: United Nations Pubns, 2011. ISBN 9780897149921 0897149920.
2. *Water reuse: issues, technologies, and applications*. New York: McGraw-Hill, 2007. ISBN 9780071459273. TD429 .W38515 2006
3. GIRALDO R., Beatriz Elena. *Estadísticas de la Microempresa en Colombia - Análisis Comparativo 1990 - 2005*. abril 2007. S.I.: Corporación para el Desarrollo de las Microempresa.
4. GLOBAL WATER INTELLIGENCE. *Global Water Tariffs Continue Upward Trend - Vol 12, Issue 9* [En línea]. septiembre 2011. S.I.: s.n. Disponible en: <http://www.globalwaterintel.com/archive/12/9/market-profile/global-water-tariffs-continue-upward-trend.html>.
5. *Tarifas Vigentes AMB S.A ESP* [En línea]. 29 febrero 2012. S.I.: AMB S.A ESP. Disponible en: <http://www.amb.com.co/DocumentoInfo/ACTOTARIFASDEFINITIVO2008.PDF>. Actualización de tarifas del servicio de Acueducto y otros servicios complementarios que presta el acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P a partir de la vigencia 2012
6. PEPSICO. *Manual de Calidad PEPSICO Internacional - Procesos de Manufactura*. 2004. S.I.: PEPSICO Beverages International.
7. TAY, Joo-Hwa y JEYASEELAN, S. Membrane filtration for reuse of wastewater from beverage industry. In: *Resources, Conservation and Recycling*. octubre 1995, Vol. 15, no. 1, págs 33-40. DOI 10.1016/0921-3449(95)00012-8.
8. FRANCO TORRES, Omar, GARCÍA HERRÁN, Martha, VARGAS MARTÍNEZ, Nelson Omar, SÁNCHEZ LANCHEROS, Félix Darío, GONZÁLEZ RAMÍREZ, Carmenza, SALDARRIAGA OROZCO, Gabriel, RODRÍGUEZ NAVARRETE, César, ORJUELA ORJUELA, Luz Consuelo, BEDOYA SOTO, Mauricio, JARAMILLO RODRÍGUEZ, Omar, VERDUGO RODRÍGUEZ, Nelsy, WILCHES SUÁREZ, Hernando, PIÑEROS BOTERO, Andrea, CAÑAS CERVANTES, Hugo, CONTRERAS TRUJILLO, Claudia y RUIZ MURCIA, Franklin. *Estudio Nacional del Agua 2010*. Bogotá DC: Instituto de Hidrología, Meteorología. y Estudios Ambientales. IDEAM, 2010. ISBN 978-958-8067-32-2 ©.
9. HODGSON, Brock. *Development of a Cost Effective and Energy Efficient Treatment System for Graywater Reuse for Toilet Flushing at the Multiresidential*

- Scale*. 2012. S.I.: Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University.
10. FRIEDLER, Eran y GILBOA, Yael. Performance of UV disinfection and the microbial quality of greywater effluent along a reuse system for toilet flushing. In: *Science of The Total Environment*. abril 2010, Vol. 408, no. 9, págs 2109-2117. DOI 10.1016/j.scitotenv.2010.01.051.
 11. MARCH, J.G, GUAL, M y OROZCO, F. Experiences on greywater re-use for toilet flushing in a hotel (Mallorca Island, Spain). In: *Desalination*. abril 2004, Vol. 164, no. 3, págs 241-247. DOI 10.1016/S0011-9164(04)00192-4.
 12. MOURAD, Khaldoon A., BERNDTSSON, Justyna C. y BERNDTSSON, Ronny. Potential fresh water saving using greywater in toilet flushing in Syria. In: *Journal of Environmental Management*. octubre 2011, Vol. 92, no. 10, págs 2447-2453. DOI 10.1016/j.jenvman.2011.05.004.
 13. NOLDE, Erwin. Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings – over ten years experience in Berlin. In: *Urban Water*. diciembre 2000, Vol. 1, no. 4, págs 275-284. DOI 10.1016/S1462-0758(00)00023-6.
 14. HILLS, S, BIRKS, R y MCKENZIE, B. The Millennium Dome «Watercycle» experiment: to evaluate water efficiency and customer perception at a recycling scheme for 6 million visitors. In: *Water Science & Technology*. 2002, Vol. 46, no. 6-4¿7, págs 233-240.
 15. NGHIEM, Long D., OSCHMANN, Nadine y SCHÄFER, Andrea I. Fouling in greywater recycling by direct ultrafiltration. In: *Desalination*. febrero 2006, Vol. 187, no. 1-3, págs 283-290. DOI 10.1016/j.desal.2005.04.087.
 16. CENTER FOR THE STUDY OF THE BUILT ENVIRONMENT (CSBE). *Graywater Reuse in Other Countries and its Applicability to Jordan*. 2003. S.I.: s.n.
 17. ALKHATIB, R. Y., ROESNER, L. A. y MARJORAM, C. An Overview of Graywater Collection and Treatment Systems. In: [En línea]. S.I.: American Society of Civil Engineers, 19 mayo 2006. págs 1-10. [Visitada 27 mayo 2013]. Disponible en: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40856%28200%29363>.
 18. US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Guidelines for Water Reuse*. 2012. S.I.: US Environmental Protection Agency (US EPA) Washington, DC, USA.
 19. PIDOU, Mark. *Hybrid membrane processes for water reuse*. PhD Thesis. S.I.: Cranfield University, 2006.
 20. LI, Fangyue, WICHMANN, Knut y OTTERPOHL, Ralf. Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. In: *Science of The Total Environment*. mayo 2009, Vol. 407, no. 11, págs 3439-3449. DOI 10.1016/j.scitotenv.2009.02.004.

21. STEPHENSON, T., PIDOU, M., JEFFERSON, B., JEFFREY, P. y MEMON, F. A. Greywater recycling: treatment options and applications. In: *Proceedings of the ICE - Engineering Sustainability*. 9 enero 2007, Vol. 160, no. 3, págs 119-131. DOI 10.1680/ensu.2007.160.3.119.
22. AGUADO ALONSO, José. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid: Dykinson, 2012. ISBN 9788490311479 8490311471.
23. US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Water Treatment Manuals*. 1995. S.I.: US Environmental Protection Agency (US EPA) Washington, DC, USA.
24. LECHEVALLIER, Mark W. *Water treatment and pathogen control process efficiency in achieving safe drinking-water* [En línea]. London: Published on behalf of the World Health Organization by IWA Pub., 2004. [Visitada 28 mayo 2013]. ISBN 1423790162 9781423790167. Disponible en: <http://site.ebrary.com/id/10137824>.
25. *Membrane separations technology: principles and applications*. Amsterdam ; New York: Elsevier, 1995. Membrane science and technology series, 2. ISBN 044481633X. TP159.M4 M455 1995
26. RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia, ARANGO RUIZ, Álvaro y GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando. *La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*. 2006. S.I.: Producción + Limpia.
27. CIABATTIA, I., CESARO, F., FARALLI, L., FATARELLA, E. y TOGNOTTI, F. Demonstration of a treatment system for purification and reuse of laundry wastewater. In: *Desalination*. septiembre 2009, Vol. 245, no. 1-3, págs 451-459. DOI 10.1016/j.desal.2009.02.008.
28. VALLEJO G., María Cristina. *La Iniciativa Yasuní-ITT Desde una Perspectiva Multicriterial*. Quito: Programa Conjunto para la Conservación y Manejo Sostenible del Patrimonio Natural y Cultural de la Reserva de Biosfera Yasuní, 2011. ISBN 9789978993996 9978993991.
29. PROMETHEE-GAIA. *Biblio.Promethee-GAIA* [En línea]. 2013. S.I.: s.n. Disponible en: <http://www.promethee-gaia.net/files/BiblioPromethee.pdf>.
30. BEHZADIAN, Majid, KAZEMZADEH, R.B., ALBADVI, A. y AGHDASI, M. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. In: *European Journal of Operational Research*. enero 2010, Vol. 200, no. 1, págs 198-215. DOI 10.1016/j.ejor.2009.01.021.
31. *Decreto 1686 de 2012 - Por el cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir para la fabricación, elaboración, hidratación, envase, almacenamiento, distribución, transporte, comercialización, expendio, exportación e importación de bebidas alcohólicas destinadas para consumo humano* [En línea]. 2012. S.I.: Ministerio de Salud Y Protección Social.

Disponible en:
<http://www.invima.gov.co/images/pdf/normatividad/alimentos/decretos/bebidas%20alcoholicas.pdf>.

32. US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Water conservation plan guidelines*. 1998. S.I.: US Environmental Protection Agency (US EPA) Washington, DC, USA.
33. TIWARI, Sangya-Sangam K., SCHMIDT, Wolf-Peter, DARBY, Jeannie, KARIUKI, Z. G. y JENKINS, Marion W. Intermittent slow sand filtration for preventing diarrhoea among children in Kenyan households using unimproved water sources: randomized controlled trial. In: *Tropical Medicine & International Health*. noviembre 2009, Vol. 14, no. 11, págs 1374-1382. DOI 10.1111/j.1365-3156.2009.02381.x.
34. MANZ, David H. *New Horizons for Slow Sand Filtration*. 2004. S.I.: Proceedings of the Eleventh Canadian National Conference and Second Policy Forum on Drinking Water and the Biennial Conference of the Federal-Provincial- Territorial Committee on Drinking Water,.
35. GERBA, C.P., STRAUB, T.M., ROSE, J.B., KARPISCAK, M.M., FOSTER, K.E. y BRITAIN, R.G. Water quality study of graywater treatment systems. In: *Water Resources Bulletin*. 1995, Vol. 31, no. 1, págs 109-116.
36. GARDNER, Ted y MILLAR, Grant. The performance of a greywater system at the Healthy Home in south east Queensland. In: *Lanfax Labs*. 2003, págs 145-152.
37. LEE, Tse-Luen. *Biosand Household Water Filter Project In Nepal*. Master of engineering in Civil and Environmental Engineering. S.I.: Massachusetts Institute Of Technology, 2001.
38. *Reaching the unreached: challenges for the 21st century*. London: Intermediate Technology Publications, 1997. ISBN 1853394122. ACQUISITION IN PROCESS
39. SINCERO, Arcadio P. *Physical-chemical treatment of water and wastewater*. London : Boca Raton, Fla: IWA Pub. ; CRC Press, 2003. ISBN 1587161249. TD430 .S47 2003
40. BUTLER, Erick, HUNG, Yung-Tse, YEH, Ruth Yu-Li y SULEIMAN AL AHMAD, Mohammed. Electrocoagulation in Wastewater Treatment. In: *Water*. 6 abril 2011, Vol. 3, no. 4, págs 495-525. DOI 10.3390/w3020495.
41. ILHAN, Fatih, KURT, Ugur, APAYDIN, Omer y GONULLU, M. Talha. Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. In: *Journal of Hazardous Materials*. junio 2008, Vol. 154, no. 1-3, págs 381-389. DOI 10.1016/j.jhazmat.2007.10.035.
42. LIN, Chin-Jung, LO, Shang-Lien, KUO, Chao-Yin y WU, Chung-Hsin. Pilot-Scale Electrocoagulation with Bipolar Aluminum Electrodes for On-Site Domestic

- Greywater Reuse. In: *Journal of Environmental Engineering*. marzo 2005, Vol. 131, no. 3, págs 491-495. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:3(491).
43. BARRERA-DÍAZ, Carlos, LINARES-HERNÁNDEZ, Ivonne, ROA-MORALES, Gabriela, BILYEU, Bryan y BALDERAS-HERNÁNDEZ, Patricia. Removal of Biorefractory Compounds in Industrial Wastewater by Chemical and Electrochemical Pretreatments. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 4 febrero 2009, Vol. 48, no. 3, págs 1253-1258. DOI 10.1021/ie800560n.
 44. MORANTE G., Gonzalo. Electrocoagulación de Aguas Residuales. In: *Revista Colombiana de Física*. 2002, Vol. 34, no. 2, págs 484-487.
 45. MERZOUK, B., GOURICH, B., SEKKI, A., MADANI, K., VIAL, Ch. y BARKAOUI, M. Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process. In: *Chemical Engineering Journal*. 1 julio 2009, Vol. 149, no. 1-3, págs 207-214. DOI 10.1016/j.cej.2008.10.018.
 46. Electroflocculation. In: [En línea]. [Visitada 4 abril 2013]. Disponible en: <http://sshf1.algaecollection.com/Default.aspx>.
 47. Electro Coagulation | Grey Water Recycling | Waste Water Treatment | Sewage Management. In: [En línea]. [Visitada 4 abril 2013]. Disponible en: <http://www.eflo.com/html/eflo-ec.html>.
 48. LAZAROVA, Valentina. Wastewater Treatment for Water Recycling. In: LAZAROVA, Valentina y BAHRI, Akiça (eds.), *Water Reuse for Irrigation* [En línea]. S.I.: CRC Press, 2004. págs 163-234. [Visitada 6 junio 2013]. ISBN 978-1-56670-649-0, 978-0-203-49940-5. Disponible en: <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9780203499405.ch7>.
 49. MULDER, Marcel. *Basic principles of membrane technology*. 2nd ed. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic, 1996. ISBN 079234247X. TP159.M4 M85 1996
 50. LANGLAIS, B., TRIBALLEAU, S., FAIVRE, M. y BOURBIGOT, M. Test on Microfiltration as a Tertiary Treatment Downstream of Fixed Bacteria Filtration. In: *Water Science & Technology*. 1992, Vol. 25, no. 10, págs 219–230.
 51. HART, M. R., HUXSOLL, C. C., TSAI, L. S., NG, K. C., KING, A. D., JONES, C. C. y HALBROOK, W. U. Microfiltration of Chicken Process Waters for Reuse: Plant Studies and Projected Operating Costs. In: *Journal of Food Process Engineering*. abril 1990, Vol. 12, no. 3, págs 191-210. DOI 10.1111/j.1745-4530.1990.tb00050.x.
 52. Greywater Treatment System - Aqua2us GWTS1200. In: [En línea]. [Visitada 9 mayo 2013]. Disponible en: <http://www.aqua2use.com/products/gwts1200.html>.
 53. *Aqua2use_Greywater_Treatmnet_systemhome_version.pdf* [En línea]. S.I.: s.n. [Visitada 7 junio 2013]. Disponible en:

http://www.aqua2use.com/upload_files/products/Aqua2use_Greywater_Treatmnet_systemhome_version.pdf.

54. REN, Rong. Adsorption of Quaternary Ammonium Compounds onto Activated Sludge. In: *Journal of Water Resource and Protection*. 2011, Vol. 03, no. 02, págs 105-113. DOI 10.4236/jwarp.2011.32012.
55. BRANS, Jean-Pierre y MARESCHAL, Bertrand. Promethee Methods. In: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* [En línea]. New York: Springer-Verlag, [no date]. págs 163-186. [Visitada 17 junio 2013]. ISBN 0-387-23067-X. Disponible en: http://www.springerlink.com/index/10.1007/0-387-23081-5_5.
56. VETSCHERA, Rudolf y DE ALMEIDA, Adiel Teixeira. A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems. In: *Computers & Operations Research*. mayo 2012, Vol. 39, no. 5, págs 1010-1020. DOI 10.1016/j.cor.2011.06.019.
57. VINODH, S. y JEYA GIRUBHA, R. PROMETHEE based sustainable concept selection. In: *Applied Mathematical Modelling*. noviembre 2012, Vol. 36, no. 11, págs 5301-5308. DOI 10.1016/j.apm.2011.12.030.
58. ISHIZAKA, Alessio y NEMERY, Philippe. Selecting the best statistical distribution with PROMETHEE and GAIA. In: *Computers & Industrial Engineering*. noviembre 2011, Vol. 61, no. 4, págs 958-969. DOI 10.1016/j.cie.2011.06.008.
59. SANTOS, C., TAVEIRA-PINTO, F., CHENG, C.Y. y LEITE, D. Development of an experimental system for greywater reuse. In: *Desalination*. enero 2012, Vol. 285, págs 301-305. DOI 10.1016/j.desal.2011.10.017.
60. US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Guidelines for Water Reuse*. 2004. S.I.: US Environmental Protection Agency (US EPA) Washington, DC, USA.

ANEXOS

ANEXO A

Listado de artículos de metodología PROMETHEE, aplicada a soluciones medioambientales

1. **Abu-Taleb, M.F., Deason, J.P., Mareschal, B., Salameh, E., 1992.** Multiobjective decision support for water resources planning., in Jordan's water resources and their future potential, Eds A. Gärber et E. Salameh, Friedrich Ebert Stiftung, pp.79-97.
2. **Abu-Taleb, M.F., Mareschal, B., 1995.** Water resources planning in the middle East: Application of the PROMETHEE V multicriteria method. *European Journal of Operational Research* 81, 500–511.
3. **Al-Kloub, B., Al-Shemmeri, T., Pearman, A., 1997.** The role of weights in multi-criteria decision aid, and the ranking of water projects in Jordan. *European Journal of Operational Research*, 99 (2), 278-288.
4. **Al-Rashdan, D., Al-Kloub, B., Dean, A., Al-Shemmeri, T., 1999.** Environmental impact assessment and ranking the environmental projects in Jordan. *European Journal of Operational Research* 118, 30–45.
5. **Ananda, J., Herath, G., 2009.** A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. *Ecological Economics*, 68 (10), 2535-2548.
6. **Aragonés-Beltran, P., Mendoza-Roca, J.A., Bes-Pia, A., Garcia-Melon, M., ParraRuiz, E., 2009.** Application of multicriteria decision analysis to jar-test results for chemicals selection in the physical–chemical treatment of textile wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 164 (1), 288-295
7. **Bradaric, Z., Srdelic, M., Mladineo, N, Pavasovic, S., 2008.** Places of refuges selection for ships aiming at reduction of environmental hazard. *Environmental Problems in Coastal Regions VII*, 127-135.
8. **Briggs, Th., Kunsch, P.L., Mareschal, B., 1990.** Nuclear waste management: An application of the multicriteria PROMETHEE methods. *European Journal of Operational Research* 44, 1–10.
9. **Brüggemann, R., Voigt, K., Restrepo, G., Simon, U., 2008.** The concept of stability fields and hot spots in ranking of environmental chemicals. *Environmental Modelling & Software*, 23 (8), 1000-1012.
10. **Brunner, N., Starkl, M., 2004.** Decision aid systems for evaluating sustainability: a critical survey. *Environmental Impact Assessment Review*, 24 (4), 441-469.

11. **Buchholz, T., Rametsteiner, E., Volk, T.A., Luzadis, V.A., 2009.** Multi Criteria Analysis for bioenergy systems assessments. *Energy Policy*, 37 (2), 484-495.
12. **Carmody, O., Frost, R.L., Xi, Y., Kokot, S., 2007.** Adsorption of hydrocarbons on organo-clays – implications for oil spill remediation. *Journal of Colloid and Interface Science* 305, 17–24.
13. **Carroll, S., Goonetilleke, A., Dawes, L., 2004.** Framework for soil suitability evaluation for sewage effluent renovation. *Environmental Geology* 46, 195–208.
14. **Cavallaro, F., 2009.** Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renewable Energy*, 34 (7), 1678-1685.
15. **Chen, Z., Li, H., Ren, H., Xu, Q., Hong, J., 2011.** A total environmental risk assessment model for international hub airports. *International Journal of Project Management*, 29 (7), 856-866.
16. **De Brucker, K., Macharis, C., Verbeke, A., 2012.** Multi-criteria analysis and the resolution of sustainable development dilemmas: a stakeholder management . *European Journal of Operational Research*, in press.
17. **Delhaye, C., Teghem, J., Kunsch, P., 1991.** Application of the ORESTE method to a nuclear wastemanagement problem. *International Journal of Production Economics* 24 (1–2), 29–39.
18. **Diakoulaki, D., Georgioua, P., Tourkolias, C., Georgopoulou, E., Lalas, D., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., 2007.** A multicriteria approach to identify investment opportunities for the exploitation of the clean development mechanism. *Energy Policy* 35, 1088–1099.
19. **Dutta, D., Das Gupta, A., Ramnarong, V., 1998.** Design and optimization of a ground water monitoring system using GIS and multicriteria decision analysis. *Ground Water Monitoring & Remediation* 18(1), 139–147.
20. **Friend, A.J., Ayoko, G.A., Guo, H., 2011.** Multi-criteria ranking and receptor modelling of airborne fine particles at three sites in the Pearl River Delta region of China. *Science of The Total Environment*, 409, 4, 719-737.
21. **Geldermann, J., Spengler, T., Rentz, O., 2000.** Fuzzy outranking for environmental assessment. Casestudy: Iron and steel making industry. *Fuzzy Sets and Systems*, 115, 45–65.
22. **Georgopoulou, E., Sarafidis, Y., Diakoulaki, D., 1998.** Design and implementation of a group DSS for sustaining renewable energies exploitation. *European Journal of Operational Research* 109, 483–500.
23. **Goletsis, Y., Psarras, J., Samouilidis, J.E., 2003.** Project ranking in the Armenian energy sector using a multicriteria method for groups. *Annals of Operations Research*, 120, 135–157

24. **Gorseta, D., Mladineo, N., Knezic, S., 2002.** Choosing the optimal policies for risk reduction in mine contaminated areas. *Risk Analysis*, 3, 497-506.
25. **Goumas, M., Lygerou, V.A., Papayannakis, L.E., 1999.** Computational methods for planning and evaluating geothermal energy projects. *Energy Policy*, 27, 3, 147-154.
26. **Goumas, M., Lygerou, V., 2000.** An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. *European Journal of Operational Research*, 123, 606–613.
27. **Gunawardena, J., Egodawatta, P., Ayoko, G.A., Goonetilleke, A., 2012.** Role of traffic in atmospheric accumulation of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Atmospheric Environment*, 54, 502-510.
28. **Hajkowicz, S., Collins, K., 2007.** A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resource Management*, 21, 1553–1566.
29. **Hajkowicz, S., Higgins, A., 2008.** A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. *European Journal of Operational Research*, 184, 1, 255–265.
30. **Haralambopoulos, D.A., Polatidis, H., 2003.** Renewable energy projects: Structuring a multicriteria group decision-making framework. *Renewable Energy*, 28, 961–973.
31. **Hermans, C.M., Erickson, J.D., 2007.** Multicriteria decision analysis: Overview and implications for environmental decision making. *Advances in the Economics of Environmental Resources*, 7, 213–228.
32. **Hermans, C.M., Erickson, J.D., Noordewier, T., Sheldon, A., Kline, M., 2007.** Collaborative environmental planning in river management: An application of multicriteria decision analysis in the White River Watershed in Vermont. *Journal of Environmental Management*, 84, 534–546.
33. **Herva, M., Roca, E., 2013.** Ranking municipal solid waste treatment alternatives based on ecological footprint and multi-criteria analysis. *Ecological Indicators*, 25, 77–84.
34. **Hokkanen, J., Salminen, P., 1997.** Locating a waste treatment facility by multicriteria analysis. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6, 175–184.
35. **Hong, G.H., Kim, S.H., Suedel, B.C., Clarke, J.U., Kim, J., 2010.** A decision-analysis approach for contaminated dredged material management in South Korea. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 6, 1, 72–82.

36. **Huth, A., Drechsler, M., Kohler, P., 2005.** Using multicriteria decision analysis and a forest growth model to assess impacts of tree harvesting in Dipterocarp lowland rain forests. *Forest Ecology and Management*, 207, 215–232.
37. **Ilic, I., Bogdanovic, D., Zivkovic, D., Milosevic, N., Todorovic, B., 2011.** Optimization of heavy metals total emission, case study: Bor (Serbia). *Atmospheric Research*, 101, 1-2, 450-459.
38. **Kangas, A., Kangas, J., Pykalainen, J., 2001.** Outranking methods as tools in strategic natural resources planning. *Silva Fennica* 35 (2), 215–227.
39. **Kangas, J., Kangas, A., Leskinen, Pykalainen, J., 2001.** MCDM methods in strategic planning of forestry on state-owned lands in Finland: Applications and experiences. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 10, 257–271.
40. **Kapepula, K.M., Colson, G., Sabri, K., Thonart, T., 2007.** A multiple criteria analysis for household solid waste management in the urban community of Dakar. *Waste Management* 27 (11), 1690–1705.
41. **Karkazis, J., 1989.** Facilities location in a competitive environment: Apromethee based multiple criteria analysis. *European Journal of Operational Research* 42, 294–304.
42. **Khalil, W.A.-S., Goonetilleke, A., Kokot, S., Carroll, S., 2004.** Use of chemometrics methods and multicriteria decision-making for site selection for sustainable onsite sewage effluent disposal. *Analytica Chimica Acta* 506, 41–56.
43. **Khalil, W.A.-S., Shanableh, A., Rigby, P., Kokot, S., 2005.** Selection of hydrothermal pre-treatment conditions of waste sludge destruction using multicriteria decision-making. *Journal of Environmental Management* 75, 53–64.
44. **Khelifi, O., Lodolo, A., Vranes, S., Centi, G., Miertus, S., 2006.** A web-based decision support tool for groundwater remediation technologies election. *Journal of Hydroinformatics* 8, 91–100.
45. **Kiker, G.A., Bridges, T.S., Varghese, A., Seager, T.P., Linkovjj, I., 2005.** Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. *Integrated Environmental Assessment and Management* 1 (2), 95–108.
46. **Kodikara, P., Perera, B., Kularathna, M., 2010.** Stakeholder preference elicitation and modelling in multi-criteria decision analysis - A case study on urban water supply. *European Journal of Operational Research*, Volume 206, Issue 1, 209-220.

47. **Kumar, A., Sokhansanj, S., Flynn, P.C., 2006.** Development of a multicriteria assessment model for ranking biomass feedstock collection and transportation systems. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 129 (1–3), 71–87.
48. **Lim, M.C.H., Ayoko, G.A., Morawska, L., Ristovski, Z.D., Jayaratne, E.R., Kokot, S., 2006.** A comparative study of the elemental composition of the exhaust emissions of cars powered by liquefied petroleum gas and unleaded petrol. *Atmospheric Environment* 40, 3111–3122.
49. **Linkov, I., Satterstrom, F.K., Kiker, G., Batchelor, C., Bridges, T., Ferguson, E., 2006.** From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications. *Environment International* 32 (8), 1072–1093.
50. **Macedo, M.G.C., Gomes, L.F.A.M., Rangel, L.A.D., 2012.** Sustainability indicators in the mining industry: an evaluation by PROMETHEE II. *Revista de Administração do Gestor*, 2 (1), 137-166.
51. **Madlener, R., Kowalski, K., Stagl, S., 2007.** New ways for the integrated appraisal of national energy scenarios: The case of renewable energy use in Austria. *Energy Policy*, 35,6060–6074.
52. **Mahbub, P., Ayoko, G.A., Goonetilleke, A., Egodawatta, P., 2011.** Analysis of the build-up of semi and non volatile organic compounds on urban roads. *Water Research*, 45, 9, 2835-2844.
53. **Mahbub, P., Goonetilleke, A., Ayoko, G.A., Egodawatta, P., 2011.** Effects of climate change on the wash-off of volatile organic compounds from urban roads. *Science of the Total Environment*, 409, 19, 3934-3942.
54. **Mahmoud, M.R., Garcia, L.A., 2000.** Comparison of different multicriteria evaluation methods for the Red Bluff diversion dam. *Environmental Modelling & Software* 15, 471–478.
55. **Margeta, J., Fontane, D.G., Ko, S.K., 1990.** Multicriteria ranking wastewater disposal alternatives for coastal towns. *Water International*, 15, 2, 80–89.
56. **Mavrotas, G., Ziomas, I.C., Diakoulaki, D., 2006.** A Combined MOIP–MCDM approach to building and screening atmospheric pollution control strategies in Urban regions. *Environmental Management*, 38, 1, 149–160.
57. **Morais, D.C., de Almeida, A.T., 2006.** Group decision model to manage water losses. *Pesquisa Operacional*, 26, 3, 567–584.
58. **Morais, D.C., De Almeida, A.T., 2007.** Group decision-making for leakage management strategy of water network. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 2, 441–459.

59. **Morais, D.C., De Almeida, A.T., 2012.** Group decision making on water resources based on analysis of individual rankings. *Omega*, 40, 1, 42-52.
60. **Mostert, M., Ayoko, G., Kokot, S., 2010.** Application of chemometrics to analysis of soil pollutants. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 29, 5, 430-445.
61. **Munda, G., Nijkamp, P., Rietveld, P., 1995.** Application of chemometrics to analysis of soil pollutants. *European Journal of Operational Research*, 82, 1, 79-97.
62. **Nasiri, H., Darvishi Bolorani, A., Faraji Sabokbar, H.A., Jafari, H.R., Hamz, M., Rafii, Y., 2012.** Determining the most suitable areas for artificial groundwater recharge via an integrated PROMETHEE II-AHP method in GIS environment (case study: Garabaygan Basin, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, DOI: 10.1007/s10661-012-2586-0
63. **Ozelkan, E.C., Duckstein, L., 1996.** Analysing water resources alternatives and handling criteria by multi criterion decision techniques. *Journal of Environmental Management* 48,69–96.
64. **Palma, J., Graves, A.R., Burgess, P.J., van der Werf, W., Herzog, F., 2007.** Integrating environmental and economic performance to assess modern silvoarable agroforestry in Europe. *Ecological Economics* 63, 759–767.
65. **Passuello, A., Cadiach, O., Perez, Y., Schuhmacher, M., 2012.** A spatial multicriteria decision making tool to define the best agricultural areas for sewage sludge amendment. *Environmental International*, 38, 1, 1-9.
66. **Petras, J.C.E., 1997.** Ranking the sites for low and intermediate level radioactive waste disposal facilities in Croatia. *International Transaction in Operation Research* 4 (4), 237–249.
67. **Phillis, Y., Grigoroudis, E., Kouikoglou, V., 2011.** Sustainability ranking and improvement of countries. *Ecological Economics*, Volume 70, Issue 3, 542-553.
68. **Pires, A., Chang, N., Martinho, G., 2011.** An AHP-based fuzzy interval TOPSIS assessment for sustainable expansion of the solid waste management system in Setúbal Peninsula, Portugal. *Resources, Conservation and Recycling*, 56 (1), 7-21.
69. **Pohekar, S.D., Ramachandran, M., 2004.** Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8, 365–381.
70. **Pohekar, S.D., Ramachandran, M., 2004.** Multi-criteria evaluation of cooking energy alternatives for promoting parabolic solar cooker in India. *Renewable Energy* 29, 1449–1460.

71. **Polatidis, H., Haralambopoulos, D.A., 2007.** Renewable energy systems: A societal and technological platform. *Renewable Energy* 32, 329–341.
72. **Raju, K.S., Duckstein, L., Arondel, C., 2000.** Multicriterion analysis for sustainable water resources planning: A case study in Spain. *Water Resources Management* 14, 435–456.
73. **Rezouga, F., Boubaker, O., Speriendio, M., Hamdi, M., 2004.** Multi-objective optimization of continuous activated sludge process treating industrial waste water. *Proceedings of MOPGP'04*.
74. **Salminen, P., Hokkanen, J., Lahdelma, R., 1998.** Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems. *European Journal of Operational Research* 104, 485–496.
75. **San Cristobal Mateo, J.R., 2012.** Fuzzy PROMETHEE. *Multicriteria Analysis in the Renewable Energy Industry, Green Energy and Technology*, 73–76.
76. **Simon, U., Bruggemann, R., Pudenz, S., 2004.** Aspects of decision support in water management – example Berlin and Potsdam (Germany) I – spatially differentiated evaluation. *Water Research* 38, 1809–1816.
77. **Simon, U., Bruggemann, R., Behrendt, H., Shulenberger, E., Pudenz, S., 2006.** METEOR: A step-by-step procedure to explore effects of indicator aggregation in multi criteria decision aiding – application to water management in Berlin, Germany. *Acta Hydrochim Hydrobiol* 34, 126–136.
78. **Spengler, T., Geldermann, J., Htihre, S., Sieverdingbeck, A., Rentz, O., 1998.** Development of a multiple criteria based decision support system for environmental assessment of recycling measures in the iron and steel making industry. *Journal of Cleaner Production* 6, 37–52.
79. **Sultana, A., Kumar, A., 2012.** Ranking of biomass pellets by integration of economic, environmental and technical factors. *Biomass and Bioenergy*, 39, 344–355.
80. **Tsoutsos, T., Drandaki, M., Frantzeskaki, N., Iosifidis, E., Kiosses, I., 2009.** Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. *Energy Policy*, 37 (5), 1587-1600.
81. **Vaillancourt, K., Waub, J.P., 2002.** Environmental site evaluation of waste management facilities embedded into EUGENE model: A multicriteria approach. *European Journal of Operational Research* 139, 436–448.
82. **Van Huylbroeck, G., 1997.** Multicriteria tools for the trade-off analysis in rural planning between economic and environmental objectives. *Applied Mathematics and Computation*, 83 (2-3), 261-280.

83. **Van Huylbroeck, G., Jacobs, G., Vanrolleghem, P., 2000.** A simulation model to evaluate the impact of environmental programmes on dairy farms. *International Transactions in Operational Research*, 7, 2, 171–183.
84. **Vego, G., Kucar-Dragicevic, S.K., Koprivanac, N., 2008.** Application of multi-criteria decision-making on strategic municipal solid waste management in Dalmatia, Croatia. *Waste Management*, 28, 11, 2192–2201.
85. **Vuk, D., Kozelj, B., Mladineo, N., 1991.** Application of multicriterial analysis on the selection of the location for disposal of communal waste. *European Journal of Operational Research* 55 (2), 211–217.
86. **Walther, G., Spengler, T., Queiruga, D., 2008.** Facility location planning for treatment of large household appliances in Spain. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 8, 4, 405–418.
87. **Wang, J.J., Jing, Y., Zhang, C., Zhao, J., 2009.** Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (9), 2263-2278.
88. **Yan, J., Dagang, T., Yue, P., 2007.** Ranking environmental projects model based on multicriteria decision-making and the weight sensitivity analysis. *Journal of Systems Engineering and Electronics* 18 (3), 534–539.
89. **Yatsalo, B., Kiker, G., Kim, J., Bridges, T., Seager, T., Gardner, K., Satterstrom, F.K., Linkov, I., 2007.** Application of multicriteria decision analysis tools to two contaminated sediment case studies. *Integrated Environmental Assessment and Management* 3 (2), 223–233.
90. **Zhang, K., Kluck, C., Achari, G., 2009.** A Comparative Approach for Ranking Contaminated Sites Based on the Risk Assessment Paradigm Using Fuzzy PROMETHEE. *Environmental Management*, 44 (5), 952-967.

ANEXO B

Informe de resultados de las aguas de lavado de la empresa Bodegas del Cañizal, elaborado por PSL PROANALISIS LTDA.



**PSL
PROANALISIS
LTDA**

NIT. 800.193.010-3

LABORATORIO DE ANALISIS
ACREDITACION IDEAM NTC ISO - IEC 17025
CERTIFICACION DE BUREAU VERITAS ISO 9001, ISO 14001, ISO 18001
Análisis Físico-Químico, Microbiológico y
Biológico de Aguas, Suelos y Aire
Proyectos, Asesorías, Servicios, Diseños e
Ingeniería de la Industria Petrolera y Ambiental

INFORME DE RESULTADOS

Informe No.: 512-12

Fecha de emisión: 14 de Noviembre del 2012

Solicitante: Leonardo Manzano Paredes

Dirección: CALLE 20 No: 13-27

Procedimiento de muestreo: Propio del Cliente

Muestras tomadas por: Cliente

Plan de muestreo: LEM-2012-31-10

Lugar y punto de muestreo: Bodega Cañizal

Fecha de muestreo: Octubre 31 de 2012

Tipo de muestra: Muestra Simple

Matriz de la muestra: Agua Potable

Muestra recibida por: Adriana Torres

Fecha / Hora de recepción: Octubre 31 de 2012/ 04:11 Pm

Fecha de análisis: 31 Octubre al 13 Noviembre del 2012

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS

ANÁLISIS	IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S)	UNIDADES	MÉTODO DE ANÁLISIS	DECRETO 1594 DE 1994 (1)	DECRETO 1575 DE 2007/ RES. 2115 DE 2007 (2)
	Lavado de Embalses de Bodega				
Sólidos Totales	859	mg/L	S.M. 2540 B	*	*
Sólidos Suspendedos	37,9	mg/L	S.M. 2540 D	R>80%	*
DBO5	324	mg O ₂ /L	S.M. 5210 B	R>80%	*
DQO	546	mg O ₂ /L	S.M. 5220 C	*	*
Grasas y aceites	110	mg/L	S.M. 5520-B	R>80%	*
pH	11,47	Unidades de pH	S.M. 4500-H	5 - 9	6,5 - 9,0
Conductividad eléctrica	1741	µS /cm	S.M. 2510 B	*	1000
Turbiedad	9,97	NTU	S.M. 2130 B	*	2
Color	125	mg Pt/Co	Método Estándar Platino-Cobalto APHA	*	15
Alcalinidad Total	378	mg CaCO ₃ / L	S.M. 2320	*	200

BUCARAMANGA, CARRERA 14 No. 55-18 - TELEFAX: (097) 6444625 - 6415176 - CEL. 300 2006390

www.pslproanalisis.com - E-mail: pslproanalisis@yahoo.com - info@pslproanalisis.com

F-040 Rev. 3 30-04-2010



**PSL
PROANALISIS
LTDA**

LABORATORIO DE ANALISIS
ACREDITACION IDEAM NTC ISO - IEC 17025
CERTIFICACION DE BUREAU VERITAS ISO 9001, ISO 14001, ISO 18001
Análisis Físico-Químico, Microbiológico y
Biológico de Aguas, Suelos y Aire
Proyectos, Asesorías, Servicios, Diseños e
Ingeniería de la Industria Petrolera y Ambiental

NIT. 800.193.010-3

ANÁLISIS	IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S)	UNIDADES	MÉTODO DE ANÁLISIS	DECRETO 1594 DE 1984 (1)	DECRETO 1575 DE 2007/ RES. 2115 DE 2007 (2)
	Lavado de Embalses de Bodega				
Dureza Total	60,0	mg CaCO ₃ / L	S.M. 2340 C	*	300

S.M.: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21^a Edition, 2005, APHA, AWWA, WEF.

J.R.: J. Rodier, Análisis de las aguas. Ediciones Omega S.A., Barcelona, 1998.

(1) Decreto de Vertimientos, valores máximos permitidos

(2) Decreto para el control de la calidad del agua para consumo humano, valores máximos permitidos según Resolución 2115 de 2007

* Límite de Cuantificación del Método

* La norma no contempla valores

- Laboratorio acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM mediante resolución de acreditación N° 1661 de Agosto 11 de 2010 con la cual se renovó el alcance de la acreditación del laboratorio bajo los lineamientos de la norma NTC ISO/IEC 17025 "Requisitos generales de competencia de laboratorios de ensayo y calibración" versión 2005 para los siguientes análisis en la matriz agua: Alcalinidad total, cloruros, conductividad, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, dureza total, pH, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, Nitratos, Sulfatos, Grasas y aceites, Muestreo simple y compuesto; se extendió el alcance de la acreditación para los siguientes análisis en la matriz aguas: Nitratos, Plomo total y disuelto, Cadmio total y disuelto, Cromo total y disuelto, Hierro total y disuelto, Plata total y disuelto, Fenoles totales; se extendió el alcance de la acreditación para los siguientes análisis en la matriz aire: Toma de muestras y análisis de laboratorio para la determinación de la concentración másica de dióxido de nitrógeno en la atmósfera, Toma de muestras y análisis de laboratorio para la determinación de la concentración másica de dióxido de azufre en la atmósfera, Toma de muestras y análisis de laboratorio para la determinación de partículas suspendidas totales en la atmósfera, Toma de muestras y análisis de laboratorio para la determinación de material Particulado como PM10 en la atmósfera.

- Laboratorio autorizado por el Ministerio de la Protección Social para realizar análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano, según resolución N° 431 de Marzo 5 de 2012.

- Laboratorio inscrito en el Sistema Nacional Ambiental (SINA) del Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

- Participante en el programa de pruebas interlaboratorios del IDEAM y en el programa interlaboratorios de control de calidad para agua potable PICCAP coordinado por el Instituto Nacional de Salud.

*"Este informe de laboratorio es válido únicamente para las muestras analizadas y relacionadas en él
Cualquier reproducción parcial requiere de la autorización de PSL PROANALISIS LTDA"*

Revisado y Aprobado por:


JAVIER MAURICIO PABÓN
QUÍMICO PQ - 2838
Director del Laboratorio
PSL PROANALISIS LTDA

BUCARAMANGA, CARRERA 14 No. 55-18 - TELEFAX: (097) 6444625 - 6415176 - CEL. 300 2006390
www.pslproanalysis.com - E-mail: pslproanalysis@yahoo.com - info@pslproanalysis.com

F-040 Rev. 3 30-04-2010



PSL PROANÁLISIS LTDA

INFORME DE RESULTADOS

Informe No.: 12 -LM- PSL-30	Fecha de emisión: 16 de noviembre de 2012
Solicitante: Leonardo Manzano	Dirección:
Procedimiento de muestreo: No aplica	Plan de muestreo: No aplica
Muestras tomadas por: El Cliente	Tipo de muestra: Simple
Lugar y punto de muestreo: Aguas tomadas en el área de lavado de embalses de Bodega	Muestra recibida por: Andrés Coronado
Fecha de muestreo: 07 de noviembre de 2012	Fecha de análisis: 08 al 15 de Nov de 2012
Matriz de la muestra: Agua Residual	
Fecha / Hora de recepción: 07 de noviembre de 2012	

MUESTRAS ANALIZADAS	
Código interno	Identificación de las muestras
12-190-LA-K	Lavado de embalses de Bodega

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS

ANÁLISIS	CÓDIGO INTERNO DE LA(S) MUESTRA(S)	UNIDADES	METODO DE ANALISIS
	12-190-LA-K		
ANÁLISIS REALIZADOS EN EL LABORATORIO			
COLIFORMES TOTALES	<3	NMP/100 ml	NTC 4458
COLIFORMES FECALES	<3	NMP/100 ml	NTC 4458

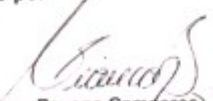
Observaciones: Se recomienda utilizar otro tipo de envase para la toma de la muestra, en el mercado hay unas bolsas estériles marca Nasco Whirl-pak de diferentes tamaños.

S.M.: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21ª Edition, 2005, APHA, AWWA, WEF.
J.R.: J. Rodier, Análisis de las aguas Ediciones Omega S.A., Barcelona, 1998.


Laboratorio acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM mediante resolución de acreditación N° 1661 de Agosto 11 de 2010 con la cual se renovó el alcance de la acreditación del laboratorio bajo los lineamientos de la norma NTC ISO/IEC 17025 "Requisitos generales de competencia de laboratorios de ensayo y calibración" versión 2005 para los siguientes análisis en la matriz agua: Alcalinidad total, cloruros, conductividad, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, dureza total, pH, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, Nitros, Sulfatos, Grasas y aceites, Muestreo simple y compuesto, se extendió el alcance de la acreditación para los siguientes análisis en la matriz agua: Nitratos, Plomo total y disuelto, Cadmio total y disuelto, Hierro total y disuelto, Plata total y disuelto, Fencoles totales, se extendió el alcance de la acreditación para los siguientes análisis en la matriz aire: Toma de muestras y análisis de laboratorio para la determinación de la concentración máscica de dióxido de nitrógeno en la atmósfera, Toma de muestras y análisis de laboratorio para la determinación de la concentración máscica de dióxido de azufre en la atmósfera, Toma de muestras y análisis de laboratorio para la determinación de partículas suspendidas totales en la atmósfera, Toma de muestras y análisis de laboratorio para la determinación de material Particulado como PM10 en la atmósfera.
Laboratorio autorizado por el Ministerio de la Protección Social para realizar análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano, según resolución N° 431 de Marzo 5 de 2012.
Laboratorio inscrito en el Sistema Nacional Ambiental (SINA) del Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
Participante en el programa de pruebas interlaboratorias del IDEAM y en el programa interlaboratorio de control de calidad para agua potable PICCAP coordinado por el Instituto Nacional de Salud.

"Este informe de laboratorio es válido únicamente para las muestras analizadas y relacionadas en él. Cualquier reproducción parcial requiere de la autorización de PSL PROANÁLISIS LTDA"

Revisado por


Narly Viviana Bayona Camperos
Bacterióloga Esp. Qca. Ambiental RP 9400-06
Director Laboratorio Microbiología

Aprobado por:


Alfredo Granados Sanabria
Químico TP PQ-11036
Coordinador Técnico

ANEXO C

Listado de equipos e implementos propuestos para el proyecto y cotizaciones incluida la importación, si es necesaria.


[1] Filtro Aqua2use UG GWDD	
	<p>Aqua2use® greywater diverter includes:</p> <p>Matala® filter media</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ low density : FSM190, black ▪ medium density : FSM290, green ▪ hight density : FSM365, blue ▪ super high density : FSM460, gray <p>Matala® submersible pump</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ manage up to 25 gallons per minute of greywater ▪ ¼ HP, Head (m) 7, Flow (LPM) 120 <p>Matala® Electrical ump control</p> <p>Matala® injection tanks & fittings</p>
\$674.00 + \$37.00 shipping	http://www.amazon.com/Aqua2use-Water-Filter-Garden-Landscape/dp/B0072JQYP2/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1369515743&sr=8-1&keywords=aqua2use
Precio Colombia: 711+105 trans. + 175 Imp. US\$ 991	
[2] Colempaques Tanque 500L	
	<p>Tipo - Tanques</p> <p>Características - Tanque de fácil instalación, con aletas que permiten que la tapa permanezca fija, con aditivo U.V que bloquea los rayos ultravioleta, haciéndolo más resistente a la intemperie.</p> <p>Material - PVC</p> <p>Capacidad – 500L</p> <p>Uso - Para almacenamiento de agua</p> <p>Color - Negro</p>
Precio Colombia: COP \$144,900.00 US\$ 77.00	http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/31651/Tanque-500-litros?passedNavAction=push
[3] Arena sílice 20-30	

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arena 20/30 ▪ sacos de polipropileno de 50k
<p>Precio Colombia: COP \$200,000.00 (tonelada) US\$ 112.00</p>	<p>http://medellin.olx.com.co/venta-arena-silice-blanca-excelente-calidad-iid-450280297</p>


<p>[4] Pedrollo - Bomba centrífuga 1/2 hp 110 v</p>	
	<p>Características: Accesorio plomería, tipo bomba centrífuga, 1/2 hp (370 watts), consume menos energía, evita que las sobrecargas dañen su motor, abastecimiento seguro de agua.</p> <p>Material: Hierro - bronce</p> <p>Recomendaciones: Para mejores resultados, instalar la motobomba lo más cerca posible de la cisterna y a una altura mínima del espejo del agua</p>
<p>Precio Colombia: COP \$325,000.00 (tonelada) US\$ 180.00</p>	<p>http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/103207/Bomba-centrifuga-1/2-hp-110-v?passedNavAction=</p>


<p>[5] Rusco 3/4-100ST-F Polyester Screen Sediment Trapper System</p>
--

	<p>Specs: Mesh Size: 100 Micron: 152 Contaminant Reduction: shale, shell, debris, pipe scale, and sand/grit (course, fine, and very fine) Inlet/Outlet Pipe Size Dimension: 3/4" Maximum Pressure: 150 PSI at 73 degrees F. (23C) Maximum Temperature: 100 deg F. at 40 PSI Minimum Flow Rate For Spin-Down Action: 1 GPM Service Flow Rate: 10 GPM Maximum Flow Rate: 20 GPM</p>
<p>\$83.90 + \$9.62 shipping</p>	<p>http://www.amazon.com/Rusco-4-100ST-F-Polyester-Sediment-Trapper/dp/B00BYO0KNS/ref=sr_1_5?ie=UTF8&qid=1369429036&sr=8-5&keywords=Rusco+3%2F4-100ST-F+Polyester+Screen+Sediment+Trapper+System</p>
<p>Precio Colombia: 93.52 + 32 trans. + 22 Imp. US\$ 147.5</p>	

<p>[6] Del Ozone Eclipse II - Pool Water Ozonator For Pools up to 15K Gallons</p>	
	<p>Average Delivery: 0.5 g/hr Average Ozone Concentration: 700 ppm Electrical (110/120V): 0.12A / 20W</p>
<p>\$859.99</p>	<p>http://www.amazon.com/Del-Ozone-Eclipse-II-Ozonator/dp/B0037TP074/ref=pd_sim_sbs_lg_2</p>
<p>Precio Colombia: 859.99 + 10 trans. + 223.6 Imp. US\$ 1093.6</p>	


<p>[7] Del Ozone DELIU211 Injector Manifold w/2" ports, Universal</p>
--

	<p>Del Ozone - Injector Manifold w/2" ports, Universal, automaticFlow Rate: 20 GPM</p>
<p>\$195.11 + \$12.45 shipping</p>	<p>http://www.amazon.com/Del-Ozone-DELIU211-Universal-automatic/dp/B0087N4VTI/ref=sr_1_20?ie=UTF8&qid=1370357832&sr=8-20&keywords=ozone+Injector</p>
<p>Precio Colombia: 207.6 + 18 trans. + 51 Imp. US\$ 276.6</p>	


<p>[8] Colempaques Tanque 1000L</p>	
	<p>Tipo - Tanques Características - Tanque de fácil instalación, con aletas que permiten que la tapa permanezca fija, con aditivo U.V que bloquea los rayos ultravioleta, haciéndolo más resistente a la intemperie. Material - PVC Capacidad – 1000L Uso - Para almacenamiento de agua Color - Negro</p>
<p>Precio Colombia: COP \$240,000.00 US\$ 140.00</p>	<p>http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/31652/Tanque-1000-litros?skuld=&passedNavAction=</p>

<p>[9] Evans Electrobomba sumergible con motor monofásico</p>	
	<p>Tipo: Bombas sumergibles y tipo fuente Características: Bomba sumergible Hmax: 7m Qmax: 120 l/min HP: 0.70 1 pulgada 350W VALSI de Colombia Ltda Uso: Desagüe de sótanos inundados, elevación o tanques y riego de jardines pequeños</p>

<p>Precio Colombia: COP \$240,000.00 US\$ 140.00</p>	<p>http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/17560/Electrobomba-sumergible-con-motor-monofasico?passedNavAction=</p>
---	--


<p>[10] Pyramid PS52KX 50-Ampere Power Supply with Built-In Cool Fan</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> • Perfect for Home, Shop and Hobbyist • Built-in Cooling Fan • Input: 115V AC, 60Hz, 800 Watts • Output: 12~15V DC(Adjustable) • 40 AMP Constant/52 AMP Surge • Powers 12V DC Devices such as Cellular Phones, CB Radios, Scanners, HAM Radios, Autosound Systems,etc. • Screw Terminal Connectors • Crowbar Over Voltage Protection • Short Circuit & Thermal Protection • Fuse Protected • LED Condition Indicators • 3 Prong Grounded AC Plug • Heavy Duty Rack Mountable Cabinet & Heatsink • Electronic Overload Protection w/Auto Reset • Dimensions: 12”L x 19”W x 4.5”H
<p>\$215.49</p>	<p>http://www.amazon.com/Pyramid-PS52KX-50-Ampere-Supply-Built-/dp/B0002BWC0I/ref=sr_1_2?s=electronics&ie=UTF8&qid=1370500902&sr=1-2&keywords=50-Ampere+Power+Supply</p>
<p>Precio Colombia: 215.49+ 145.5 trans. + 56 Imp. US\$ 417</p>	<p>http://www.amazon.com/Pyramid-PS52KX-50-Ampere-Supply-Built-/dp/B0002BWC0I/ref=sr_1_2?s=electronics&ie=UTF8&qid=1370500902&sr=1-2&keywords=50-Ampere+Power+Supply</p>


<p>[11] Rusco 3/4-500ST-F Polyester Screen Sediment Trapper System</p>


	<ul style="list-style-type: none"> • Rusco 34-500ST-F Spin-Down Sediment Trapper: • Screen Mesh Size:500 • Micron Rating:30 • Contaminant Reduction: shale, shell, debris, pipe scale, and sand/grit (course, fine, and very fine) • Inlet/Outlet Pipe Size dimension: .75" • Maximum Pressure: 150 PSI at 73 degrees F. (23C) • Maximum Temperature: 100 deg F. at 40 PSI • Minimum Flow Rate For Spin-Down Action: 1 GPM • Service Flow Rate: 10 GPM • Maximum Flow Rate: 20 GPM • Length: 14-3/8" • Width: 7-1/4"
<p>\$83.90 + \$9.62 shipping</p>	<p>http://www.amazon.com/Rusco-4-100ST-F-Polyester-Sediment-Trapper/dp/B00BYO0KNS/ref=sr_1_5?ie=UTF8&qid=1369429036&sr=8-5&keywords=Rusco+3%2F4-100ST-F+Polyester+Screen+Sediment+Trapper+System</p>
<p>Precio Colombia: 93.52 + 32 trans. + 22 Imp. US\$ 147.5</p>	

<p>[12] Evans Electrobomba 3/4 hp centrifuga</p>	
	<p>Características: Accesorio plomería, tipo bomba centrifuga, 3/4 HP (600 watts), consume menos energía, evita que las sobrecargas dañen su motor, abastecimiento seguro de agua.</p> <p>Material: Hierro - bronce</p> <p>Recomendaciones: Para mejores resultados, instalar la motobomba lo más cerca posible de la cisterna y a una altura mínima del espejo del agua</p>
<p>Precio Colombia: COP \$318,900.00</p>	<p>http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/182088/Electrobomba-3/4-hp-</p>

US\$ 178.00	centrifuga?passedNavAction=push
-------------	---

[13] Rusco 3/4-1000ST-F Polyester Screen Sediment Trapper System	
	<p>Mesh Size:1000Micron Rating:15Contaminant Reduction: shale, shell, debris, pipe scale, and sand/grit (course, fine, and very fine)Inlet/Outlet Pipe Size dimension:.75" Maximum Pressure: 150 PSI at 73 degrees F. (23C) Maximum Temperature: 100 deg F. at 40 PSI Minimum Flow Rate For Spin-Down Action: 1 GPM Service Flow Rate: 10 GPM Maximum Flow Rate: 20 GPM Length: 14-3/8" Width: 7-1/4" Materials of Construction: Body Material: PVC Cover Material: High Impact Polymer Resin Screen Material: Polyester</p>
\$86.98 + \$9.62 shipping	http://www.amazon.com/Rusco-4-1000ST-F-Polyester-Sediment-Trapper/dp/B00BYO04ZC/ref=sr_1_cc_1?s=aps&ie=UTF8&qid=1370724068&sr=1-1-catcorr&keywords=Rusco+3%2F4-1000-F
Precio Colombia: 96.6 + 32 trans. + 22.4 Imp. US\$ 151	


[14] Watts 270154 8-GPM 3/4-Inch 110-Volt UV Disinfection System	
	<p>Mesh Size:1000Micron Rating:15Contaminant Reduction: shale, shell, debris, pipe scale, and sand/grit (course, fine, and very fine)Inlet/Outlet Pipe Size dimension:.75" Maximum Pressure: 150 PSI at 73 degrees F. (23C) Maximum Temperature: 100 deg F. at 40 PSI Minimum Flow Rate For Spin-Down Action: 1 GPM Service Flow Rate: 10 GPM Maximum Flow Rate: 20 GPM Length: 14-3/8" Width: 7-1/4" Materials of Construction: Body Material: PVC Cover Material: High Impact Polymer Resin Screen Material: Polyester</p>
\$228.19	http://www.amazon.com/Rusco-4-1000ST-F-Polyester-Sediment-Trapper/dp/B00BYO04ZC/ref=sr_1_cc_1?s=aps&ie=UTF8&qid=1370724068&sr=1-1-catcorr&keywords=Rusco+3%2F4-1000-F
Precio Colombia: 228.19+ 32 trans. + 59 Imp. US\$ 319.2	

[15] Filtro Aqua2use UG GWDD	
	<p>Aqua2use® greywater diverter includes: Matala® filter media</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ low density : FSM190, black ▪ medium density : FSM290, green ▪ high density : FSM365, blue ▪ super high density : FSM460, gray
\$399 + \$27.00 shipping	http://www.besthomewatersavers.com/products.php?product=Aqua2Use-Gravity-Graywater-Filter-(no-pump)
Precio Colombia: 399+80 trans. + 103 Imp. US\$ 582	


[16] Dayton 10A174 Float Switch, 2 HP, 115/230V, Cord 20 Ft	
	<p>Float Switch, Mechanical, Tether, Normally Open, Stripped Connection, Max. Amps Running 15, HP @ 1 Phase - 115V 2, HP @ 1 Phase - 230V 2, Voltage 115/230, Wire Gauge 14, Pumping Range Min./Max. 3 to 22, VA Rating 3600, Float Material ABS, Body Material ABS, Control Range Adjustable, Max. Voltage 240, Max. Wattage 3600, Turns Off At 45 Deg Above</p>
\$57.00 + \$6.12 shipping	http://www.amazon.com/Dayton-10A174-Float-Switch-230V/dp/B007OXFL1Y/ref=sr_1_22?ie=UTF8&qid=1370730863&sr=8-22&keywords=Float+Switch+2HP
Precio Colombia: 57 + 10 trans. + 15 Imp. US\$ 82	


[17] Goulds 2 HP 1 Phase 230V centrifugal Self-Priming Pump
--

	<p>Centrifugal Pump, Power Rating 2 HP, Voltage @ 60 Hz 230 Volts, Phase Single, Full Load Amps 21.6, Motor Enclosure ODP, NPT Inlet 1 1/2 Inches, Outlet Port 1 1/2 Inches, Length 20 9/16 Inches, Height 9 1/4 Inches, Width 8 1/4 Inches, Self Priming</p> <p>Phase : 1, GPM @ 50 PSI : 41, Thermal Protection : Automatic Reset, Features : Casing Design Prevents the Seal from Running Dry, Back Pull Out Design for Ease of Maintenance,</p>
<p>\$449.00 + \$50.49 shipping</p>	<p>http://www.amazon.com/Goulds-Phase-230V-centrifugal-Self-Priming/dp/B000LEILQK</p>
<p>Precio Colombia: 449 + 230 trans. + 117 Imp. US\$ 796</p>	


<p>[18] Hydronix SPC-25-2010 Polyester Pleated Filter 2.5" OD X 20" Length, 10 Micron</p>	
	<p>Specs:. Product Dimensions: 20" H x 2.5" W. Initial PSI at Flow Rate (gpm): 1 PSI at 20 gpm (0.1 bar at 76 L/min). Micron Rating: 10. Temperature Range: 40 degree F to 125 degree F (4.4 degree C to 51.7 degree C). Filter Media: Non-woven polyester. End Caps: Vinyl plastisol. Core: Polypropylene.</p>
<p>\$17.05</p>	<p>http://www.amazon.com/Hydronix-SPC-25-2010-Polyester-Pleated-Filter/dp/B00D04BKC0/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1371297154&sr=8-1&keywords=SPC-25-2010</p>
<p>Precio Colombia: 17.05 + 12 trans. + 4.4 Imp. US\$ 33.9</p>	


[19] Pentek 20-Bb 1 Whole House Water Filter System

	<p>Pentek #20 Big Blue Water Filter Housing: Dimensions: 23-3/8" x 7-1/4" (594 mm x 184 mm) Maximum Temperature: 100°F (37.8°C) Maximum Pressure: 90 psi (6.2 bar)</p>
<p>\$85.56 + \$9.10 shipping</p>	<p>http://www.amazon.com/Pentek-20-Bb-Whole-Filter-System/dp/B00CVT3UFA/ref=sr_1_5?ie=UTF8&qid=1370725496&sr=8-5&keywords=20-BB+1%22+Whole+House</p>
<p>Precio Colombia: 85.56 + 21 trans. + 22 Imp. US\$ 128.6</p>	

<p>[20] KX Matrikx +1 01-425-125-20 Carbon Block Filter (20" x 4.25")</p>	
	<p>KX Matrix 01-425-125-20 Carbon Block Filter Specs: Dimensions: 20" L x 4.25" W Initial Pressure Change @ Flow = 8.5 psid @ 4.0 GPM Maximum Operating Temperature: 125°F Maximum Operating Pressure: 250 psig Maximum Differential Pressure: 100 psid Collapse Pressure: 200 psid</p>
<p>\$77.96 + \$9.62 shipping</p>	<p>http://www.amazon.com/KX-Matrikx-01-425-125-20-Carbon-Filter/dp/B00BYNZ4HQ/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1370725768&sr=8-1&keywords=KX+Matrikx+%2B1+01-425-125-20+Carbon+Block</p>
<p>Precio Colombia: 78 + 30 trans. + 20 Imp. US\$ 128</p>	

<p>[21] Rain Bird P2A Water Pressure Gauge</p>

	<p>Water pressure gauge 3/4-Inch female hose thread adapter Attaches to outside faucets</p>
<p>\$4.99</p>	<p>http://www.amazon.com/Rain-Bird-P2A-Water-Pressure/dp/B00004RACK/ref=pd_bxgy_hi_img_z</p>
<p>Precio Colombia: 4.99 + 10 trans. + 1.3 Imp. US\$ 16.3</p>	

<p>[22] Aqua2use GWTS 1200</p>	
	<p>Uniqueness of Aqua2use Greywater Treatment System:</p> <ul style="list-style-type: none"> Low power consumption: +/- 2kWh /KL produced No chemical & disinfectants added No new water needed for backwash Modern design easily integrates with the environment User friendly : process is automatic & self-maintaining Long lasting Matala filter media, no regular replacement needed Progressive biofilter: copes with fluctuating flows & different levels of pollution
<p>\$10000</p>	<p>http://www.aqua2use.com/products/gwts1200.htm</p>
<p>Precio Colombia: 10,000 + 980 trans. + 2,600 Imp. US\$ 13,580.00</p>	<p>!</p>