



**018530 - SWITCH**

## **Sustainable Water Management in the City of the Future**

Integrated Project  
Global Change and Ecosystems

### **Potencial de reuso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación por agua residual en el valle geográfico del río cauca**

Due date of deliverable: January, 2011  
Actual submission date: January, 2011

Start date of project: 1 February 2006  
months

Duration: 60

Lead partner: UNIVALLE

Revision: final

Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006)		
Dissemination Level		
PU	Public	
PP	Restricted to other programme participants (including the Commission Services)	
RE	Restricted to a group specified by the consortium (including the Commission	
CO	Confidential, only for members of the consortium (including the Commission Services)	X

**POTENCIAL DE REUSO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA COMO  
ESTRATEGIA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR  
AGUA RESIDUAL EN EL VALLE GEOGRÁFICO DEL RÍO CAUCA**

**MARÍA FERNANDA JARAMILLO LL.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL MEDIO AMBIENTE  
MAESTRIA EN INGENIERIA – ÉNFASIS EN SANITARIA Y AMBIENTAL  
SANTIAGO DE CALI  
2010**



**POTENCIAL DE REUSO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA COMO  
ESTRATEGIA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR  
AGUA RESIDUAL EN EL VALLE GEOGRÁFICO DEL RÍO CAUCA**

**MARÍA FERNANDA JARAMILLO LL.**

Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Ingeniería: área de énfasis  
en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

**DIRECTOR**

**ALBERTO GALVIS C.**

Ingeniero Sanitario M.Sc  
Universidad del Valle

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENEIRIA  
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL MEDIO AMBIENTE  
MAESTRIA EN INGENIERIA – ÉNFASIS EN SANITARIA Y AMBIENTAL  
SANTIAGO DE CALI  
2010**

## ACEPTACIÓN

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

\_\_\_\_\_  
Director de Tesis

\_\_\_\_\_  
Firma del jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del jurado

Fecha: \_\_\_\_\_

## DEDICATORIA

A Dios...

Por ser mí guía, mi sustento, mi impulso, mi todo. Por enseñarme que la fortaleza del espíritu se alcanza con la sensatez de las acciones y que en el camino emprendido, por difícil que sea, puedo en él confiar...

Jaime, Nancy, Ana,  
Paola y Felipe...

A mi familia, por ser mi punto a tierra, mi preocupación, por quien me esmero y me esfuerzo para no fallar, para no decaer, para luchar.

Ruber...

Indiscutiblemente a ti, por ser parte de mi vida, parte de este proceso, mi amigo, mi compañero, mi tutor, mi colega, un cielo que cubre gran parte de mi todo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Alberto Galvis, por su apoyo incondicional, por sus detalladas correcciones, por su valiosa colaboración en el análisis de la información y la dirección permanente de este proyecto, además por el voto de confianza depositado.

Proyecto SWITCH, por el financiamiento del proyecto.

CVC - Grupo de Recursos Hídricos, por permitirme dedicar alguna fracción de tiempo al iniciar este proceso.

Diana Zambrano y Melissa Herrera, por formar un excelente equipo de trabajo y brindarme asesoría incondicional.

Amparo Duque y Edgar Cifuentes, por sus aportes de la información suministrada, por las constantes interrupciones en su jornada laboral y por su amor a lo que realizan con la cual es posible creer que no todo es igual.

Inés Restrepo, por su dedicación en el proceso de investigación, con lo cual me permitió aclarar y vislumbrar el panorama.

Viviana Vargas, por su asesoría en el manejo y análisis de la información y asesoría en la formulación de la consulta con expertos.

Jhonny Rojas y Mario Alejandro Pérez, por su asesoría y valiosos aportes en los aspectos relacionados con análisis y evaluación económica.

A mis amigos, Sara, Julián y Diego Mauricio, siempre están conmigo.

A mis compañeros de estudio, por todos los debates generados en torno a la temática.

A mis compañeros del proyecto SWITCH, por ser un gran equipo de trabajo.

Y a todos los que de alguna manera hicieron parte de este proceso.

## **TABLA DE CONTENIDO**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>22</b>
4.1	Objetivo General	22
4.2	Específicos	22
<b>5</b>	<b>MARCO REFERENCIAL</b>	<b>23</b>
5.1	Marco conceptual	23
5.1.1	Sostenibilidad	23
5.1.2	Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH)	23
5.1.3	Producción más Limpia PmL	24
5.1.4	Análisis Beneficio-Costo	24
5.2	Reuso de agua residual en agricultura	25
5.2.1	Concepto de reuso de agua	25
5.2.2	Tratamiento para reuso en agricultura	31
5.2.3	Experiencias internacionales de reuso	32
5.2.4	Experiencias locales de reuso en agricultura - Colombia	34
<b>6</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>40</b>
7.1	Fase I. Identificación de experiencias de reuso de agua residual doméstica para riego agrícola en el valle geográfico del río Cauca.	41
7.2	Fase II. Caracterización de la potencialidad del reuso de agua residual doméstica como una estrategia para el control de la contaminación, considerando aspectos técnicos, socioeconómicos y normativos en el valle geográfico del río Cauca.	42
7.3	Fase III. Generación de una propuesta para la implementación del reuso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación en el Valle geográfico del río Cauca.	46
<b>8</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>48</b>
8.1	Identificación de experiencias de reuso de agua residual doméstica para riego en el valle geográfico del río Cauca	48

**8.2 Caracterización de la potencialidad del reuso de agua residual doméstica como una estrategia para el control de la contaminación, considerando aspectos técnicos, socioeconómicos y normativos en el valle geográfico del río Cauca.** **54**

8.2.1 Caso de estudio: Municipio de Cali – Manejo centralizado del agua residual doméstica en la planta de tratamiento de Cañaveralejo (PTAR-C) 54

8.2.2 Caso de estudio: Zona de expansión del Municipio de Cali – Manejo descentralizado del agua residual doméstica 77

8.2.3 Caso de estudio: Municipio de Buga 95

**8.3 Propuesta para la implementación del reuso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación en el Valle geográfico del río Cauca.** **108**

8.3.1 Articulación de los instrumentos de política hídrica actual en la implementación de reuso agrícola. 111

**9 CONCLUSIONES** **112**

**10 RECOMENDACIONES** **114**

**11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS** **115**

**12 ANEXOS** **118**



## LISTA DE TABLAS

Tabla 5-1 Calidad parasitológica y microbiológica de las aguas residuales para uso en agricultura	28
Tabla 5-2 Medidas de control de protección a la salud	29
Tabla 5-3 Guías sugeridas para las aguas tratadas en el reuso agrícola tratamiento	29
Tabla 5-4 Directrices para interpretar la calidad de las agua de riego	30
Tabla 5-5 Concentraciones recomendadas de elementos en traza en aguas para riego	30
Tabla 5-6 Características de los principales niveles de tratamiento	32
Tabla 6-1 Uso del agua en el Valle geográfico del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca.	37
Tabla 6-2 Carga de DBO <sub>5</sub> aportada por el municipio de Cali al río Cauca en el año 2007	39
Tabla 6-3 Aportes de carga contaminante puntual DBO <sub>5</sub> (ton/día) al río Cauca. Mediciones realizadas en 2000-2004.	39
Tabla 8-1 Identificación de experiencias de reuso indirecto no planificado.	49
Tabla 8-2 Base de datos para la caracterización de las experiencias de reuso agrícola en la zona de estudio	51
Tabla 8-3 Costos de inversión inicial del tratamiento secundario complementario de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo	55
Tabla 8-4 Dimensionamiento y requerimiento de área de las tecnológicas de tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	56
Tabla 8-5 Datos iniciales y parámetros de diseño para la tecnología de lagunas facultativas como tratamiento secundario complementario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	59
Tabla 8-6 Datos iniciales y parámetros de diseño para la tecnología de humedales construidos como tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	60
Tabla 8-7 Importancia de criterios e indicadores de selección de tecnología de tratamiento de agua residual con fines de reuso agrícola.	62
Tabla 8-8 Caracterización de las opciones tecnológicas de tratamiento de conforme a los indicadores de efectividad.	63
Tabla 8-9 Normalización de datos crudos y estimación de primer coeficiente relacional gris	64
Tabla 8-10 Estimación del segundo coeficiente relacional gris	64
Tabla 8-11 Criterios empleados para la estimación del área de riego con agua residual tratada de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	67
Tabla 8-12 Costos y beneficios identificados en la implementación del reuso agrícola.	70
Tabla 8-13 Resumen de costos de implementación reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo	71
Tabla 8-14 Estimación del beneficio “Ahorro por menor uso de fertilizantes” al implementar el reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	72
Tabla 8-15 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	72
Tabla 8-16 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	73
Tabla 8-17 Estimación del beneficio “Ahorro en infraestructura para riego” al implementar el reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	73
Tabla 8-18 Costos, beneficios y flujo de caja neto de la implementación de reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo como estrategia para el control de la contaminación hídrica.	75
Tabla 8-19 Indicadores de viabilidad socioeconómica de la implementación de reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	76
Tabla 8-20 Dimensionamiento del sistema de tratamiento en la Solución Convencional para la zona de expansión del municipio de Cali.	77

Tabla 8-21 Opciones tecnológicas de tratamiento formuladas en la <i>Solución Alternativa</i> para el manejo del agua residual en la zona de expansión en el municipio de Cali	79
Tabla 8-22 Dimensionamiento de las opciones de tratamiento de agua residual para la zona de expansión.	80
Tabla 8-23 Importancia de criterios e indicadores de selección de tecnología de tratamiento de agua residual con fines de reuso agrícola.	82
Tabla 8-24 Caracterización de las opciones tecnológicas de tratamiento de agua residual conforme a los indicadores de efectividad	83
Tabla 8-25 Normalización de datos crudos y estimación de primer coeficiente relacional gris	83
Tabla 8-26 Estimación del segundo coeficiente relacional gris	83
Tabla 8-27 Costos y beneficios identificados en la implementación del reuso agrícola.	88
Tabla 8-28 Resumen de costos de implementación reuso agrícola con el efluente del sistema de tratamiento propuesto para la zona de expansión del municipio de Cali.	89
Tabla 8-29 Estimación del beneficio “Ahorro por menor uso de fertilizantes” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para la zona de expansión del municipio de Cali.	90
Tabla 8-30 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para la zona de expansión del municipio de Cali.	90
Tabla 8-31 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para la zona de expansión del municipio de Cali.	91
Tabla 8-32 Estimación del beneficio “Ahorro en infraestructura para riego” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para la zona de expansión del municipio de Cali.	91
Tabla 8-33 Costos, beneficios y flujo de caja neto de la implementación de reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañavalejo como estrategia para el control de la contaminación hídrica.	93
Tabla 8-34 Indicadores de viabilidad socioeconómica de la implementación de reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañavalejo	94
Tabla 8-35 Dimensionamiento de las opciones de tratamiento en la <i>Solución Alternativa</i> para el manejo del agua residual en el caso del municipio de Buga	97
Tabla 8-36 Importancia de criterios e indicadores de selección de tecnología de tratamiento de agua residual con fines de reuso agrícola.	98
Tabla 8-37 Caracterización de las opciones tecnológicas de tratamiento de agua residual conforme a los indicadores de efectividad	99
Tabla 8-38 Normalización de datos crudos y estimación de primer coeficiente relacional gris	99
Tabla 8-39 Estimación del segundo coeficiente relacional gris	99
Tabla 8-40 Costos y beneficios identificados en la implementación del reuso agrícola.	103
Tabla 8-41 Resumen de costos de implementación reuso agrícola con el efluente del sistema de tratamiento propuesto para el municipio de Buga	104
Tabla 8-42 Estimación del beneficio “Ahorro por menor uso de fertilizantes” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para el municipio de Buga.	105
Tabla 8-43 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para el municipio de Buga.	105
Tabla 8-44 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para el municipio de Buga.	105
Tabla 8-45 Estimación del beneficio “Ahorro en infraestructura para riego” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para el municipio de Buga.	106
Tabla 8-47 Indicadores de viabilidad socioeconómica de la implementación de reuso agrícola	107
Tabla 8-48 Marco general de la propuesta de mejoramiento de la gestión del agua residual doméstica tratada.	109

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 Variación de la calidad del agua en el río Cauca según el índice de calidad ICAUCA. Condiciones de invierno y verano. Periodo: 1998-2002	21
Figura 5-1 Clasificación del reuso bajo el concepto de Lavrador Filho (1987).	26
Figura 6-1 Localización general de la zona de estudio	36
Figura 6-2 Usos del suelo en el Valle del Cauca.	37
Figura 6-3 Índice de escasez en cuenca del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca.	38
Figura 6-4 Variación del OD en el río Cauca bajo condiciones de invierno-verano-transición	39
Figura 7-1 Diagrama metodológico de la investigación desarrollada.	40
Figura 7-2 Esquema metodológico de la Fase I. de investigación	42
Figura 7-3 Esquema metodológico de la Fase II de investigación	46
Figura 8-1 Experiencias de reuso directo planeado en el valle geográfico del río Cauca	48
Figura 8-2 Esquema de la solución convencional para el manejo del agua residual effluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	54
Figura 8-3 Esquema de la alternativa de reuso de agua residual con lodos activados como tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	57
Figura 8-4 Esquema de la solución alternativa de reuso de agua residual con lagunas facultativas como tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	58
Figura 8-5 Esquema de la solución alternativa de reuso de agua residual con humedales construidos como tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo	60
Figura 8-6 Modelo conceptual de selección de tecnología de tratamiento secundario de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo	62
Figura 8-7 Jerarquización de las opciones de tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo con base en el segundo coeficiente relacional gris integrado	64
Figura 8-8 Usos del suelo en la zona de estudio.	65
Figura 8-9 Estimación de demanda de agua mediante metodología de balance hídrico simplificado en el área de influencia de riego con el effluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo.	66
Figura 8-10 Escenarios de potencial de reuso de agua residual con estimación de diferentes valores de área para riego en el mes crítico (Agosto).	67
Figura 8-11 Elementos a considerar en la estimación de costos utilizando el effluente de la PTAR-C en reuso agrícola	70
Figura 8-12 Análisis temporal de costos y beneficios en la <i>Situación Incremental</i> .	74
Figura 8-13 Esquemización de la solución convencional en el manejo de agua residual doméstica en la zona de expansión de Cali	77
Figura 8-14 Esquema de la <i>Solución Alternativa</i> propuesta para el manejo de agua residual doméstica en la zona de expansión del municipio de Cali	78
Figura 8-15 Modelo conceptual de selección de tecnología de tratamiento con implementación de métodos naturales y objetivo de reuso agrícola	81
Figura 8-16 Jerarquización de las opciones tecnológicas de tratamiento de agua residual de la zona de expansión con base en el segundo coeficiente relacional gris integrado	84
Figura 8-17 Estimación de demanda de agua mediante metodología de balance hídrico simplificado en la zona de expansión de Cali.	85
Figura 8-18 Validación del área potencial de riego en el caso de la implementación del reuso agrícola en la zona de expansión del municipio de Cali.	86
Figura 8-19 Análisis temporal de costos y beneficios en la <i>Situación Incremental</i> .	92
Figura 8-20 Esquemas preseleccionados para el manejo de agua residual en el municipio de Buga.	96
Figura 8-21 Esquema de la <i>Solución Alternativa</i> propuesta para el manejo de agua residual doméstica en el municipio de Buga	97
Figura 8-22 Modelo conceptual de selección de tecnología de tratamiento con implementación con objetivo de reuso agrícola	98

Figura 8-23 Jerarquización de las opciones tecnológicas de tratamiento de agua residual para el municipio de Buga con base en el segundo coeficiente relacional gris integrado	100
Figura 8-24 Estimación de demanda de agua mediante metodología de balance hídrico simplificado en la zona de expansión de Cali.	101
Figura 8-25 Validación del área potencial de riego en el caso de la implementación del reuso agrícola en el caso de estudio del municipio de Buga.	102
Figura 8-26 Análisis temporal de costos y beneficios en la <i>Situación Incremental</i> .	107
Figura 8-27 Lineamientos para mejorar la gestión del agua residual doméstica	108
Figura 8-28 Instrumentos de política hídrica Colombiana	111

## LISTA DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

### ABREVIATURAS

AHP-GRA	Proceso Analítico Jerarquico – Análisis Relacional Gris
ARCGIS	Software
CENICAÑA	Centro de Investigación para la Caña de azúcar
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria
CINARA	Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
DAGMA	Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente
DAR	Dirección Ambiental Regional
DBO	Demanda bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EMCALI	Empresas Municipales de Cali
FAO	Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación
GIRH	Gestión Integrada del Recurso Hídrico
GOD	Método de estimación de vulnerabilidad de un sistema acuífero
GODS	Método de estimación de vulnerabilidad de un sistema acuífero
IDEAM	Instituto Nacional de Estudios del Medio Ambiente y Meteorológicos
MAVTD	Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
MIKE11	Software para la modelación de la calidad de cuerpos hídricos
OD	Oxígeno Disuelto
PmL	Producción más Limpia
PROCAÑA	Asociación de productores de caña de azúcar del Valle del Cauca
PTAR-C	Planta de Tratamiento de Agua Residual de Cañaveralejo
SST	Sólidos Suspendidos Totales
VPN	Valor Presente Neto
WHO	World Health Organization

### SÍMBOLOS

mg/L	Unidad de concentración en miligramos por litro de solución
HH/L	Unidad de concentración de huevos de helminto por litro de solución
L/s-ha	Unidad de modulo de riego
L	litro - Unidad de medición de volumen
m	metro – Unidad de medición de longitud
s	segundo – Unidad de medición de tiempo
ha	hectárea – Unidad de medición de área
Kw-h	kilo vatio por hora – Unidad de medición de energía
HP	Caballo de Fuerza (por sus siglas en inglés) – Unidad de medición de potencial

## RESUMEN

La potencialidad del reuso agrícola con agua residual doméstica fue caracterizada mediante tres casos de estudio en el valle geográfico del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca. La metodología de identificación de este potencial se estructuró en tres etapas que correspondieron a la documentación de experiencias de reuso agrícola en la región, la aplicación de la evaluación socioeconómica como herramienta para caracterizar el potencial de reuso agrícola bajo el concepto de la sostenibilidad y la formulación de una propuesta en el marco de la gestión integrada del agua residual doméstica.

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación de la práctica de reuso agrícola está determinada por cuatro factores fundamentales: el factor financiero, el factor técnico, el factor ambiental y el factor sociocultural. Estos factores evaluados en los tres casos de estudio permitieron identificar la potencialidad del reuso agrícola integrado al manejo del agua de la PTAR-C, con una eficiencia económica de \$15.244 millones y una relación beneficio-costos de 1,53. Para el caso de estudio del manejo del agua residual de la zona de expansión, las condiciones de temporalidad de la práctica de riego no beneficiaron positivamente la implementación de reuso agrícola. La relación beneficio-costos fue de 0,27 con una eficiencia económica del -\$8.487 millones. En el caso de manejo del agua residual tratada del municipio de Buga la relación beneficio-costos fue de 1,01, que en términos socioeconómicos presenta una decisión indiferente para la implementación de reuso. Sin embargo se identificó mediante la modelación de la calidad del cuerpo hídrico receptor, con la aplicación del MIKE11, un impacto positivo en el aumento de la concentración OD y disminución de la concentración de DBO en los tres casos de estudio evaluados.

## SUMARY

The potential of agricultural reuse domestic wastewater was characterized by three case studies in the Cauca river valley in the department of Valle del Cauca. The methodology for identifying potential can be divided into three stages that correspond to the documentation of experiences of agricultural reuse in the region, the implementation of socio-economic assessment as a tool to characterize the potential for agricultural reuse under the concept of sustainability and the development a proposal in the context of integrated management of domestic wastewater.

The results show that the implementation of the practice of agricultural reuse is determined by four factors: the financial factor, the technical factor, the environmental factors and cultural factors. These factors evaluated in the three case studies helped identify the potential of integrated agricultural reuse water management of WWTP-C, with a cost-effectiveness of \$ 15.244 million and a benefit-cost ratio of 1,53. For the case study of wastewater management in the area of expansion, the conditions of temporary irrigation practice did not benefit positively the implementation of agricultural reuse. The benefit-cost ratio was 0,27 with economic efficiency -\$8.487 million. In the case of treated waste water management in the municipality of Buga the benefit-cost ratio was 1,01, which presents a socio-economic terms indifferent decision to implement reuse. However, it is identified by modeling the quality of receiving water body, with the implementation of MIKE11 a positive impact on the OD concentration increased and decreased the concentration of BOD in the three case studies evaluated.

## 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha evidenciado la crisis del agua como producto de las diversas acciones antropogénicas, en este sentido la comunidad internacional ha adoptado estrategias y lineamientos para enfrentarla. En la cumbre de Naciones Unidas en el 2002, se establecieron los Objetivos de Desarrollo del Milenio, que buscan reducir en un 50% el número de personas sin abastecimiento de agua segura y saneamiento apropiado para el año 2015 (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2003).

Si bien los Objetivos de Desarrollo del Milenio no definen un objetivo específico vinculado al tratamiento de aguas residuales, un aumento significativo y uso de éstas se encuentra directamente relacionado para satisfacer alguno de los objetivos, como es garantizar la sostenibilidad ambiental (Moscoso y Alfaro, 2007) y contribuir con la seguridad alimentaria, que permitirá reducir el número de personas que padecen de hambre, erradicar la pobreza extrema y evitar la mortalidad infantil a causa de enfermedades asociadas a la malnutrición (Rosemarin *et al.*, 2008), (World Health Organization, 2006).

El control de contaminación de los cuerpos hídricos contribuye con el alcance estos objetivos, dado que involucra estrategias de manejo de aguas residuales, que deben implementarse en el contexto de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, considerando la cuenca hidrográfica como la unidad de análisis (Moscoso y Alfaro, 2007).

El 90% del agua residual en los países en vías de desarrollo se descarga sin tratamiento alguno a los cuerpos hídricos. En Latinoamérica, sólo el 14% del agua residual es tratada. De ese 14%, sólo el 6% recibe adecuado tratamiento (Moscoso y Young, 2002). En Colombia, únicamente se trata el 8% de las aguas residuales generadas por los municipios (Bernal *et al.*, 2003), y las inversiones realizadas no han contribuido al mejoramiento de las fuentes hídricas.

Situaciones como éstas hacen necesaria la formulación e implementación de estrategias más costo-efectivas que contribuyan a la solución de la problemática ambiental, asociada con la contaminación de las fuentes hídricas por las descargas de aguas residuales. El reuso de agua residual en la agricultura es una de estas estrategias de control de la contaminación de los cuerpos hídricos y es una alternativa para aumentar los recursos donde se presenta escasez de agua. Sus principales beneficios están relacionados con la economía, el ambiente y la salud (Helmer y Hespanhol, 1999).

El reuso de agua residual en la agricultura se ha incrementado sustancialmente a nivel mundial (Carr *et al.*, 2004); debido a la creciente escasez de los recursos hídricos alternativos para riego, de los costos elevados de los fertilizantes, de la seguridad de que los riesgos para la salud y el daño a los suelos es mínimo cuando se toman las precauciones necesarias y del reconocimiento del valor de ésta práctica por parte de los planificadores del recurso hídrico. Sin embargo, el desconocimiento de su potencialidad considerando



aspectos normativos, sociales, ambientales y económicos; hace que el agua residual no sea vista como un recurso en la agricultura del Valle del Cauca.

El presente documento corresponde al trabajo de investigación en la maestría de Ingeniería con énfasis en Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle. La investigación estuvo orientada a identificar la potencialidad del reuso de agua residual doméstica en labores de riego agrícola, como una estrategia para el control de la contaminación del río Cauca en el marco del proyecto SWITCH, el cual es liderado a nivel internacional por UNESCO-IHE. En este proyecto participan 34 instituciones de cuatro continentes. En la Universidad del Valle la coordinación está a cargo del Instituto CINARA.

Esta investigación surge en el desarrollo de un modelo de selección de tecnología para la prevención y el control de la contaminación, que incluye los conceptos de sostenibilidad, producción más limpia, minimización y prevención, tratamiento para reuso del agua residual y la capacidad de autodepuración de la fuente receptora; todo lo anterior como elementos del proceso de selección. También incluye las características locales, la normatividad y la distribución espaciotemporal de la contaminación (Galvis, 2009).

La zona de estudio de esta investigación es la cuenca del río Cauca, segunda arteria fluvial más importante de Colombia, donde habitan más de 10 millones de personas que representan aproximadamente el 25% de la población colombiana (CVC y Universidad del Valle, 2004), específicamente en el Valle geográfico del río Cauca, que es la zona plana de la cuenca del río Cauca. Su importancia radica en la economía de Colombia, puesto que en esta zona se ha desarrollado la industria azucarera y la producción de agro combustibles.

## 2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las descargas de agua residual afectan las condiciones de calidad de los cuerpos hídricos receptores. El incremento de estas descargas se encuentra estrechamente relacionado con el acelerado crecimiento poblacional, que tiene como consecuencia implícita la reducción de disponibilidad de agua dulce por persona. En el siglo XX, el mundo triplicó la población y multiplicó por seis el uso del agua (Rijsberman, 2003).

Las acciones correctivas y el concepto de tratamiento de agua residual para descontaminar los cuerpos hídricos han sido más costosos que las medidas para evitar tal contaminación (Helmer y Hespanhol, 1999), por tanto, el tratamiento de aguas residuales debe replantearse y evolucionar al concepto de control de la contaminación, una visión más integral donde se logra una mejor utilización de los recursos disponibles.

El reuso de agua residual es una estrategia que forma parte de ese concepto, que a diferencia del concepto convencional de tratamiento del agua, presenta enfoque más lógico centrado en la minimización de las aguas residuales, refinamiento de materias primas y procesos de producción y reutilización de los residuos (Larsen *et al.*, 1999). Ésta estrategia es reconocida a nivel internacional y nacional, sin embargo, su aplicación adecuada se ha visto limitada porque se desconoce su potencialidad considerando aspectos normativos, culturales, socioeconómicos, ambientales e institucionales, en el contexto local del Valle del Cauca. El agua residual no es reconocida como un recurso en la agricultura de la región (MAVDT, 1997a).

El valor de los beneficios asociados a la implementación del reuso de agua residual no se ha estimado localmente, debido a que los beneficios de esta práctica no están determinados por el mercado, por la insuficiencia de los derechos de propiedad, la presencia de las externalidades y la falta de información adecuada (Hernández-Sancho *et al.*, 2010) citado por: (UNEP, 2010).

La evaluación de estos beneficios puede contribuir en la justificación de adecuadas políticas de inversión y mecanismos de financiación para el control de la contaminación de los cuerpos hídricos (Hernández-Sancho *et al.*, 2010) citado por: (UNEP, 2010). De ahí la importancia de este trabajo de investigación, que tiene por objeto identificar la potencialidad del reuso del agua residual doméstica en el valle geográfico del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca, considerando que esta práctica debe ser analizada no solo desde el punto de vista técnico y ambiental, sino también, desde el contexto socioeconómico, cultural y normativo.

Para generar mayores impactos, el reuso del agua residual se debe relacionar con el uso de agua en la agricultura, dado que es el principal usuario y emplea el 70% del agua disponible en el mundo (Pimentel y Pimentel, 2008), incluyendo tanto fuentes superficiales como subterráneas. En América Latina, la agricultura emplea el 73% del agua disponible (FAO, 2010) mientras que en Colombia se emplea el 54% (MAVDT, 2010).

En la zona de estudio, el valle geográfico del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca, la extracción del agua subterránea para el año 2009 fue de 499 Mm<sup>3</sup>, de los cuales el 92% se empleó en la agricultura (CVC, 2010), específicamente, para el riego de 208.121 ha de caña de azúcar (CENICAÑA, 2010). De igual forma, la cantidad de agua superficial asignada en esta zona es de 4.698,86 Mm<sup>3</sup>, de los cuales el 80% es destinado a la agricultura de la región (CVC, 2010).

La extracción de agua subterránea en el valle geográfico del río Cauca, con características de calidad superior a la requerida por el riego de caña de azúcar, evidencia la carencia de evaluación de otras fuentes potenciales como el agua residual tratada, que ofrece nutrientes esenciales para el desarrollo vegetativo de los cultivos (Van der Hoek *et al.*, 2002), (Hespanhol, 2003) y reduce los costos de utilización de energía asociada al bombeo. De acuerdo con CENICAÑA, el bombeo de agua subterránea representa el 44% de los costos asociados al riego con esta fuente.

En cuanto a aspectos económicos se refiere, el reuso de agua residual tratada en agricultura, representa beneficios a los usuarios de este recurso. Según el Ministerio Agricultura y Desarrollo Rural, la fertilización representa el 24.54% de los costos asociados a la producción de caña de azúcar. En el año 2007 el costo de fertilización por hectárea al año fue de \$652.759 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2007).

Adicionalmente se tienen problemas con el uso de fertilizantes. A nivel mundial, la agricultura utiliza aproximadamente 20 millones de toneladas de fósforo al año, que son utilizadas principalmente como fertilizantes, pero casi la mitad de estas encuentran su camino de regreso al océano (Richardson *et al.*, 2009), aproximadamente ocho veces la entrada que se da en ciclo natural del fósforo.

Situación similar sucede con el nitrógeno y la fabricación de fertilizantes, cerca de 120 millones de toneladas de nitrógeno de la atmósfera, anualmente se convierten en compuestos reactivos que contienen nitrógeno (Richardson *et al.*, 2009). Hasta dos tercios de este nitrógeno se dirige hacia lechos marinos a través de los ríos luego de ser efectuadas las labores de riego.

Éstas adiciones antropogénicas de fósforo y nitrógeno superan todas las entradas naturales a los ciclos de ambos elementos. El exceso de nitrógeno y fósforo ha generado eventos devastadores, como las mareas rojas, afectando poblaciones de peces (Rockström *et al.*, 2009) citado por: (UNEP, 2010).

Con la implementación del reuso en la agricultura se garantiza un ciclo de nutrientes más cerrado y ambientalmente más favorable, dado que estos elementos no retornarían de manera directa a los cuerpos de agua, sino que se emplearían nuevamente en la agricultura, reduciendo así las condiciones de eutrofización los cuerpos hídricos y los costos en el importe de agroquímicos a los agricultores.

El aprovechamiento del agua residual como recurso no se limita sólo a los beneficios asociados con la reducción de costos por importe fertilizantes. Existen otros beneficios al reutilizar esta agua, entre ellos, el control de la contaminación de los cuerpos hídricos, dado que la disminución de las descargas es la que contribuye al aumento de la calidad de las fuentes hídricas (Toze, 2006).

Además, la liberación de recursos económicos para los diferentes actores representa un beneficio, en este sentido al implementar el reuso de agua residual, no se realizaría el pago de tasa por utilización del agua ante la autoridad ambiental y para los prestadores del servicio de acueducto y alcantarillado, el pago de instrumentos económicos como tasa retributiva, no sería efectuado, dado que al reusar el agua residual, se reducen los vertimientos a los cuerpos hídricos. El municipio de Cali, que aporta el 38% de la contaminación puntual al río Cauca, facturó \$3.246 millones en el año 2006 por concepto de tasa retributiva (CVC, 2010), valor que podría ser economizado al implementar el reuso del agua residual.

En la zona de estudio se evidencia el reuso con agua residual de manera indirecta, es decir, agua residual cruda diluida en los cuerpos hídricos antes de efectuarse el riego. Durante los años anteriores al 2010 fueron asignados 31.415 l/s del río Cauca para el riego, con concentraciones de sólidos disueltos de 146.300 mg/l (CVC, 2010), e inferiores a las características de calidad del agua residual tratada en la PTAR-C con tratamiento primario avanzado y con concentraciones entre 423 a 546 mg/l (Universidad del Valle y EMCALI, 2006).

Ante el riego con agua residual de manera indirecta, el riego con agua residual tratada contribuye a la disminución de los riesgos asociados con esta práctica. Los suelos irrigados con agua residual tratada reciben menores concentraciones de sólidos suspendidos, evitando así el sellamiento de los poros, siendo éste, un efecto negativo que disminuye la productividad agrícola (Kass y Vargas, 1998).

### 3 ANTECEDENTES

Las soluciones que han surgido para mitigar la contaminación de las fuentes hídricas en Colombia, no han contribuido significativamente con el mejoramiento de la calidad, por el contrario, se han destinado recursos en sistemas de tratamiento que no consideran la integralidad de la gestión del agua. De los \$2,4 billones ejecutados en el 2007 en la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH), el 88% se destinó a infraestructura de agua potable y saneamiento y el 12% restante, se destinó al resto de las acciones de la GIRH relacionadas con el mejoramiento de la oferta hídrica, la gobernabilidad del recurso y el control de los riesgos asociados con el agua (MAVDT, 2010).

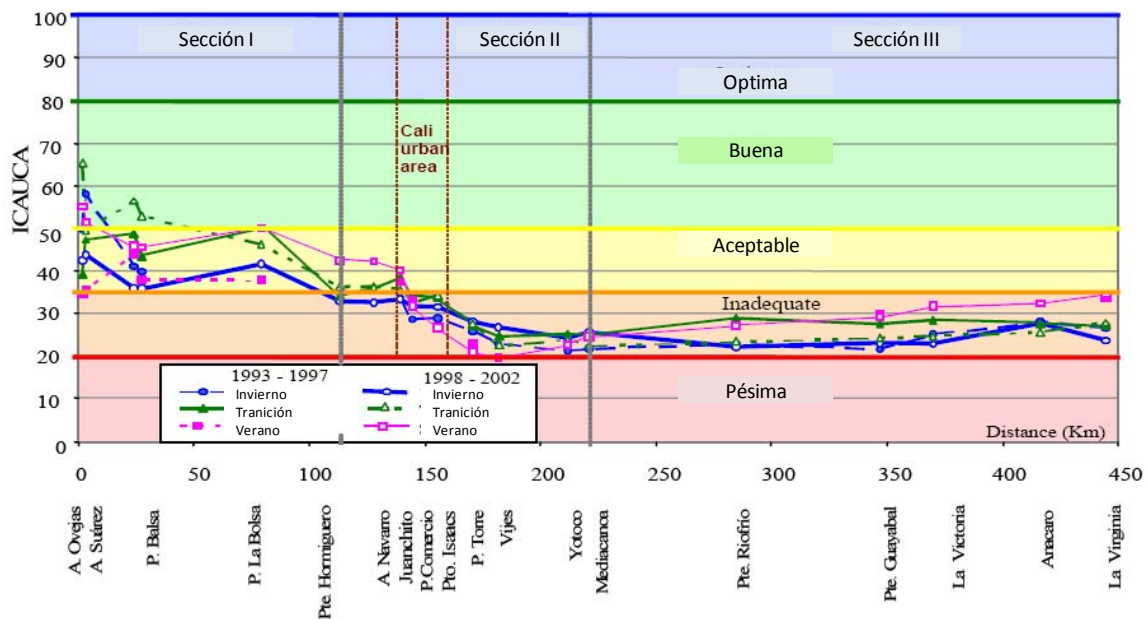
De las inversiones realizadas por las autoridades ambientales en el 2007, el 82% de los recursos fueron destinados a plantas de tratamiento de aguas residuales y sólo el 2% en acciones relacionadas con objetivos de calidad (MAVDT, 2010), evidenciando así, que las mayores inversiones realizadas en Colombia, se hacen en pro de la infraestructura necesaria para asegurar la demanda del recurso hídrico, y no para garantizar la sostenibilidad del mismo.

En el departamento del Valle del Cauca, desde el año 1976, con la adopción del Acuerdo 14 de la CVC, el tratamiento del agua residual ha estado orientado a acciones de control de contaminación con implementación de instrumentos económicos bajo el eslogan “el que contamina paga” y la centralización y depuración de las aguas residuales en sistemas de tratamiento, con base en un “enfoque de corrección” y más precisamente en acciones al *final del tubo*, con las exigencias de tratamiento secundario y eficiencia de remoción de los sistemas de tratamiento del 80%, sin tener en cuenta los objetivos de calidad de la fuente receptora (Gandini *et al.*, 2005).

Desde el año 1993 hasta el año 2002, se construyeron 6 plantas de tratamiento de aguas residuales en todo el trayecto del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca, con una inversión aproximada de \$21.539 millones<sup>1</sup> (Duque, 2010) (CVC y Universidad del Valle, 2009), (Corrales, 2003); pese a estos requerimientos normativos, el río Cauca no presentó mejoras respecto a su calidad y de acuerdo con estudios realizados, esta fuente no se encontró en condiciones óptimas para sus diferentes usos (Figura 3-1). En la actualidad (2010) el número de PTARs, en el trayecto del río Cauca en el departamento del Valle se ha incrementado a 12, con una inversión inicial adicional de \$39.935 millones<sup>1</sup> (Duque, 2010), (CVC y Universidad del Valle, 2009), (Corrales, 2003).

---

<sup>1</sup> Inversión inicial de las PTARs a precios del 2009. No incluye la inversión de la PTAR-C del municipio de Cali, pero sí los costos de obras complementarias.



**Figura 3-1 Variación de la calidad del agua en el río Cauca según el índice de calidad ICAUCA. Condiciones de invierno y verano. Periodo: 1998-2002**  
**Fuente: (Patiño *et al.*, 2005)**

De otro lado, con el aumento acelerado de la población, se ha demandado mayor producción de alimentos que ha implicado el uso de agricultura de regadío, la cual aumenta producción agrícola hasta dos veces respecto a la agricultura de secano (FAO, 2002). El uso de agua para riego ha generado problemas de escasez y conflicto por su uso. De acuerdo con la FAO, para el año 2025 alrededor de 1800 millones de personas vivirán en países o regiones con una drástica falta de agua y dos tercios de la población mundial podrían enfrentarse a la escasez del recurso (FAO, 2007).

En Colombia, muchos de los sistemas hídricos que abastecen la población evidencian vulnerabilidad alta para mantener su disponibilidad de agua. De acuerdo con el IDEAM cerca del 50% de la población de las áreas urbanas municipales está expuesta a sufrir problemas de abastecimiento a causa de las condiciones de disponibilidad, regulación y presión que existe sobre los sistemas hídricos que las atienden. La situación se hace más crítica cuando las condiciones climáticas se comportan bajo fenómenos de eventos extremos como El Niño, en los cuales la vulnerabilidad de disposición del recurso puede ser superior al 80 % (IDEAM, 2008). En el departamento del Valle del Cauca, el 90% del territorio presenta alguna forma de escasez de agua superficial, catalogada entre media, media-alta y alta (Sandoval y Soto, 2009).

Por tanto, la búsqueda de fuentes alternativas de suministro de agua en la agricultura es necesaria, y es ahí donde la determinación de la viabilidad del reuso de agua residual juega un papel importante en el contexto del Valle del Cauca, por representar un 90% de escasez del recurso hídrico superficial y una alta demanda de agua en la agricultura, con una superficie cultivada de 208.121 ha de caña de azúcar (CENICAÑA, 2010).

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo General**

Identificar la potencialidad del reuso del agua residual doméstica en la agricultura, como una estrategia para el control de la contaminación de los recursos hídricos en el Valle Geográfico del río Cauca.

### **4.2 Específicos**

- ✓ Identificar experiencias de reuso de agua residual doméstica para riego agrícola en el valle geográfico del río Cauca.
- ✓ Caracterizar la potencialidad del reuso de agua residual doméstica como una estrategia para el control de la contaminación, considerando aspectos técnicos, socioeconómicos y normativos en el valle geográfico del río Cauca.
- ✓ Generar una propuesta para la implementación del reuso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación en el Valle geográfico del río Cauca.

## **5 MARCO REFERENCIAL**

### **5.1 Marco conceptual**

#### **5.1.1 *Sostenibilidad***

La Sostenibilidad de un sistema está influenciada por diversos factores tales como: la participación de la comunidad local, la selección adecuada de tecnología, la capacidad económica y financiamiento, la operación y mantenimiento del sistema, el manejo integrado del recurso hídrico y el apoyo Institucional. De acuerdo con (Restrepo, 1998), la sostenibilidad es la capacidad de un sistema de suministrar un nivel apropiado de beneficios durante periodos extensos y que puedan ser usados de manera eficiente sin afectar el medio ambiente.

La Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo involucra más detalladamente los aspectos económicos y financieros de los sistemas, estableciendo que: la Sostenibilidad es la capacidad de un sistema de continuar desempeñando sus funciones a un nivel aceptable, durante un periodo de tiempo indefinido, haciendo uso solo de los insumos requeridos en el diseño y después de que la parte principal de la asistencia financiera, administrativa y técnica de un ente externo haya terminado y el sistema pueda ser financiado o cofinanciados por los usuarios (Restrepo, 1998) y (Galvis y Vargas, 1998).

#### **5.1.2 *Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH)***

Para una gestión equitativa y sostenible del agua se requieren de instituciones flexibles, capaces de responder a las variaciones hidrológicas, cambios socioeconómicos, valores de la sociedad y cambios de régimen político, estas situaciones pueden manejarse a través de lo que se denomina la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), cuya instrumentación han sido discutida a partir de la cumbre de Mar del Plata en Argentina, en 1977; a fin de prevenir una degradación continua de los recursos hídricos y asociados. En este sentido el principal objetivo de la GIRH debe ser la reducción de la pobreza, el desarrollo de capacidades, la participación de todos los sectores interesados y el fortalecimiento de la base legal para la gestión del recurso Global Water Partnership, citado por (Ruíz y Gentes, 2008).

La GIRH es el proceso cuyo objetivo es promover el manejo y desarrollo coordinado del agua en interacción con los demás recursos naturales y sociales, maximizando el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales Global Water Partnership, citado por (Ruíz y Gentes, 2008).



La GIRH es el paradigma que resume *el conjunto de principio, lineamientos estratégicos y recomendaciones para la acción* que se considera necesaria atender o implementar para lograr el desarrollo sustentable de los recursos hídricos Global Water Partnership, citado por (Ruíz y Gentes, 2008).

### **5.1.3 Producción más Limpia PmL**

El concepto de Producción más Limpia – PmL, es ampliamente utilizado en la mejora de procesos de producción industrial, cuyo objetivo es la minimización de los residuos y la mitigación de su impacto con el entorno. Esta estrategia ambiental es una mejora continua en los procesos y su beneficio radica en la realización de nuevas inversiones a través del mejoramiento de todo el ciclo de vida de un proceso, lo cual se encuentra directamente relacionado con la optimización de los recursos, donde se garantiza un mayor costo-beneficio en las soluciones implementadas (MAVDT, 1997c). La Producción más Limpia es el enfoque en el que los procesos son realizados de tal manera que el impacto medioambiental es tan mínimo como sea posible (Gijzen, 2000). Para esto es necesario considerar diferentes acciones como la selección adecuada de tecnología que permita mejorar la eficiencia de los procesos, el reuso de los residuos y recuperación de la mayor cantidad de subproductos.

En el marco de producción limpia, el manejo de las aguas residuales parte de la prevención de la contaminación, asociada a la reconversión de procesos (disminución o sustitución de materias primas, recirculación de agua), fabricación de bienes y productos que minimicen los efectos negativos sobre el medio ambiente y en particular sobre el recurso hídrico, reducción del consumo y reuso del recurso (MAVDT, 2004).

### **5.1.4 Análisis Beneficio-Costo**

Tradicionalmente la utilización de la evaluación económica se ha orientado a la búsqueda de lineamientos de política, para el uso eficiente y negociación de los recursos, diseño de instrumentos de control, y para realizar actividades estudiando la efectividad y agregando el factor de costo, con el fin de asegurar las inversiones óptimas en tecnología y a su vez garantizar de alguna forma la sostenibilidad del sistema, permitiendo así, generar escenarios de acción, diseñar e implantar mayores efectos en los recursos empleados y permitiendo la correcta elección de alternativas existentes e hipotéticas, estableciendo cifras confiables de los costos y sus impactos (CEPIS, 1995). La evaluación económica es un proceso de investigación científica que supone la verificación previa de la relación intervención-efecto. Los análisis Beneficio-Costo y Costo-Efectividad hacen parte del universo de alternativas de evaluación económica (Cohen y Franco, 2003).

El análisis económico del Beneficio-Costo es una técnica de evaluación que se emplea para determinar la conveniencia y oportunidad de un proyecto o de la implementación de una

alternativa de solución, comparando los valores actualizados de los costos y los beneficios, ambos expresados en términos comparables (Miranda, 2000). El objetivo de implementar el análisis Beneficio-Costo es ponderar los efectos positivos y negativos de una decisión de inversión, que se puede manifestar internamente o en forma externa a la solución formulada. En este análisis se pueden integrar la importancia de las alteraciones del "medio ambiente" que producen "externalidades" hacia otros proyectos o la comunidad.

El análisis Beneficio-Costo es la principal herramienta analítica utilizada para evaluar las decisiones ambientales. En este tipo de análisis, los beneficios de la acción propuesta se calculan y comparan con los costos totales que asumiría la sociedad si se llevara a cabo dicha acción. La complejidad del análisis costo-beneficio radica en la evaluación de intervenciones sociales involucrando alternativas de decisión, comparando su impacto y permitiendo jerarquizar las opciones (Weinstein, 1986).

## **5.2 Reuso de agua residual en agricultura**

### **5.2.1 Concepto de reuso de agua**

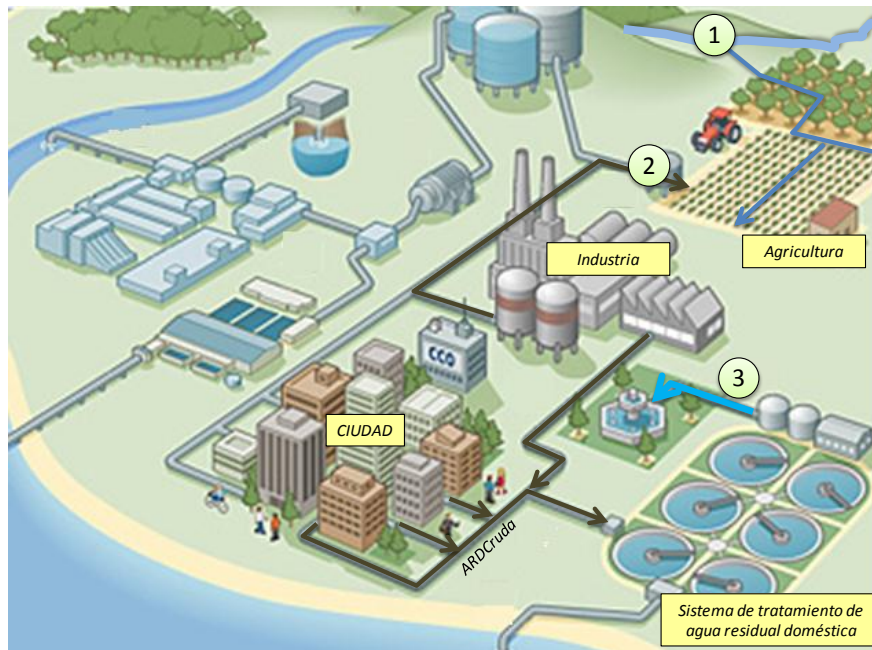
El reuso de agua residual es el aprovechamiento del agua previamente utilizada, una o más veces en alguna actividad para suplir las necesidades de otros usos (Lavrador Filho, 1987). Bajo este concepto el reuso se ha clasificado:

- ✓ Reuso indirecto no planeado: Ocurre cuando el agua es utilizada y es descargada en forma diluida en los cuerpos de agua receptores y posteriormente es utilizada de manera no intencional (Figura 5-1).
- ✓ Reuso indirecto planeado: Ocurre cuando los efluentes tratados son descargados de manera planeada a los cuerpos receptores para ser utilizados de forma intencional y controlada en algún uso beneficio (Figura 5-1).
- ✓ Reuso directo planeado: Ocurre cuando los efluentes tratados son empleados directamente en alguna aplicación de reuso local (Figura 5-1).

Una segunda clasificación fue establecida por (Westerhoff, 1984) quien tipificó el reuso de agua en dos grandes categorías:

- ✓ Reuso potable: Clasificado a su vez en directo o indirecto. Si los efluentes tratados son empleados directamente en alguna aplicación de reuso local, se denomina "Directo". Por el contrario, si el agua es utilizada y descargada en forma diluida en los cuerpos receptores y posteriormente es utilizada, se denomina "Indirecto".

- ✓ Reuso no Potable: Para fines agrícolas, industriales, domésticos, manejo de cursos de agua, acuicultura y recarga de acuíferos.



**Figura 5-1 Clasificación del reuso bajo el concepto de Lavrador Filho (1987).  
1. Reuso indirecto no planeado. 2. Reuso indirecto planeado. 3. Reuso directo planeado**

Sin embargo otros autores definen el Reuso del agua como el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas en actividad diferente a la que las originó (Lavrador Filho, 1987; MAVDT, 1997a) y paralelamente definen el concepto de *Recirculación* cuando se efectúa la utilización de aguas residuales tratadas en la actividad que la generó, siendo esta una forma especial del reuso (MAVDT, 1997a). Los tipos y aplicaciones de reuso se pueden clasificar en ocho (8) usos de acuerdo con el sector o infraestructura que recibe el beneficio: urbano, industrial, agrícola, usos urbanos no potables, recargas de aguas subterráneas, recreativos, piscicultura y usos potables (Brega Filho y Mancuso, 2003).

En el desarrollo de esta investigación el concepto adoptado de reuso es el expuesto por Lavrador Filho (1987) y clasificado de acuerdo a su uso como reuso con fines agrícolas, el cual ha considerado como una herramienta eficiente para la gestión del recurso hídrico (Manga *et al.*, 2001), surgido por la necesidad de un abastecimiento regular que compense la escasez del recurso, por causa de la estacionalidad o la distribución irregular de la oferta de otras fuentes de agua para los cultivos, a lo largo de un año.

Los beneficios asociados a esta práctica son el mejoramiento de la fertilidad de los suelos agrícolas debido al aporte de materia orgánica, posibilitando una mayor retención de agua, además el aporte de macronutrientes (N, P, K) permitiendo reducir el uso de fertilizantes químicos y trayendo beneficios económicos al sector (Hespanhol, 2003). En aspectos relacionados con la calidad, el reuso agrícola permite la preservación de las fuentes hídricas

al evitar el vertimiento directo de las aguas residuales, y considerando el medio de recepción del agua residual (suelo), permitirá un aumento en la calidad del recurso garantizando la calidad de la recarga de los acuíferos (Moscoso, 1993; Moscoso y Young, 2002).

Históricamente, el enfoque de reuso en agricultura ya es puesto en consideración en muchas regiones del mundo con agua residual cruda y de manera indirecta (Brega Filho y Mancuso, 2003). Las primeras evidencias del reuso de aguas residuales corresponden a la Antigua Grecia con sistemas de saneamiento del año 3.000 a.C en la Civilización Minoica (Asano, 1991). La disposición final de las aguas residuales directamente sobre los campos agrícolas se extiende como una solución de tratamiento en las antiguas granjas de Alemania e Inglaterra, entre 1550 y 1700. En 1920, Estados Unidos practica el reuso planificado del agua, concretamente en los estados de Arizona y California, destinando el agua para usos agrícolas (Metcalf y Eddy, 1995b). El uso de las aguas residuales para fertilizar estanques piscícolas se inició en Alemania a fines del siglo XIX. Desde 1930, Calcuta (India) cuenta con el sistema de reuso en acuicultura más grande del mundo (Moscoso *et al.*, 1992).

En cuanto a consumos de agua residual en agricultura se refiere, en el año 2006 el continente europeo empleaba 963 Mm<sup>3</sup>/año de agua residual sin tratamiento, seguidos de California, Japón y Australia con consumos de agua residual de 434, 206 y 166 m<sup>3</sup>/año respectivamente (Bixio y Wintgens, 2006). Mientras que en América Latina, alrededor de 400 m<sup>3</sup>/s de agua residual cruda son entregados a fuentes superficiales y cultivos son irrigados la mayoría de las veces con aguas residuales no tratadas (Post, 2006). En Colombia, 1.230.193 ha son irrigadas con agua residual, donde el 73% del área es regada con agua residual sin tratar y el 27% restante sin tratamiento (CEPIS/OPS *et al.*, 2002).

La práctica de reuso con agua cruda y de manera indirecta ha inducido a la preocupación mundial por los riesgos asociados a la salud pública. Por ésta razón, en el año 1973 la Organización Mundial para la Salud, elaboró un documento de “Reutilización de efluentes: métodos de tratamiento de aguas residuales y la seguridad de la salud pública”, con el fin de proteger la salud y facilitar el uso racional de las aguas residuales y excretas en la agricultura y acuicultura. Esta primera directriz se desarrolló en ausencia de buenos estudios epidemiológicos y bajo un enfoque de mínimo riesgo (Carr, 2005).

Debido al uso creciente de agua residual en la agricultura especialmente en regiones áridas y semiáridas, se iniciaron una serie de estudios epidemiológicos para proteger la salud pública. En 1986 se realizó un examen minucioso de los estudios epidemiológicos, compilando una serie de evidencias que reflejaron la necesidad de revisar las directrices establecidas en 1973, con base en estas consideraciones se actualizó en 1989 la Guía de la OMS y se incorporaron nuevas pruebas de salud como la evaluación de riesgos, e incluyeron más información acerca de la definición de riesgos tolerables para la sociedad, basada en la situación actual de la enfermedad de un determinado país (Carr, 2005). En estas guías se establecieron los parámetros de la calidad microbiológica de las aguas residuales para irrigación (Tabla 5-1).

**Tabla 5-1 Calidad parasitológica y microbiológica de las aguas residuales para uso en agricultura**

Categoría	Condiciones de reutilización	Grupo Expuesto	Nematodos intestinales (promedio aritmético de huevos/L)2	Coliformes fecales (promedio geométrico/100 ml)
A	Irigación de cultivos probablemente consumidos crudos Campos deportivos parques públicos	Agricultores, consumidores, público	$\leq 0.1$	$\leq 10^3$
B	Irigación cereales, Cultivos industriales, forrajes, pastos y árboles	Agricultores. Pero no niños < 15 años. Y comunidades cercanas	$\leq 1$	$\leq 10^5$
			Riego por aspersión	
		Agricultores. Pero no niños < 15 años. Y comunidades cercanas	$\leq 1$	$\leq 10^3$
			Riego por surcos	
C	Irigación localizada de cultivos en la categoría B, si no están expuestos los trabajadores y el público	Agricultores. Incluyendo niños < 15 años . Y comunidades cercanas	$\leq 0.1$	$\leq 10^3$
			Cualquier tipo de riego	
C	Irigación localizada de cultivos en la categoría B, si no están expuestos los trabajadores y el público	Ninguno	No aplicable	No aplicable

**Fuente:** citado por (Silva *et al.*, 2008) adaptado de: (Blumenthal *et al.*, 2000)

Las guías de la OMS (1989) no tienen normas para la vigilancia, por tanto se propone considerar su diseño, basados en objetivos de salud y consejos de medidas de protección de la salud (Kamizoulis, 2008; Mara y Bos, 2007), consideraciones que fueron tomadas en cuenta en la nueva guía de aguas residuales publicada por la OMS en el año 2006.

Las nuevas guías de uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises del año 2006, son una herramienta de manejo preventivo de aguas residuales en agricultura, proporcionan una orientación para los tomadores de decisiones sobre su aplicación en los diferentes contextos locales. Tienen como objetivo principal apoyar la formulación de normatividad y reglamentación nacional respecto al uso y manejo del agua residual, considerando aspectos propios de cada país (Blumenthal *et al.*, 2007; Kramer y Mara, 2007; Mara y Bos, 2007; World Health Organization, 2006).

Estas guías incluyen el análisis microbiológico esencial para el análisis del riesgo, que comprende la recolección de información relativa a patógenos presentes en aguas residuales, campos y cosechas regados. La guía no proporciona valores sugeridos para patógenos virales, bacteriales o protozoarios, únicamente valores de huevos de helmintos para riego restringido y sin restricción ( $\leq 1$  huevo/l) (Silva *et al.*, 2008; World Health Organization, 2006). La Tabla 5-2 presenta las medidas de protección para la salud formuladas en esta guía.

Otros lineamientos para el uso de agua residual en la agricultura fueron desarrollados. En el año 1999 la FAO publicó la guía sugerida para el “uso de aguas tratadas en el reuso agrícola y sus requerimientos de tratamiento”, en ella se clasifica el tipo de reuso agrícola en cultivos que se consumen y no se procesan comercialmente, que se consumen y se procesan comercialmente, y, cultivos que no se consumen (Tabla 5-3).

**Tabla 5-2 Medidas de control de protección a la salud**

Medida de control	Remoción de patógenos (unidades log)	Comentarios
Tratamientos	1-6	La remoción de patógenos requerida depende de la combinación selectiva de medidas de control para la protección de la salud
Riego por goteo en cultivos de bajo crecimiento	2	Tubérculos y hortalizas, como lechuga, que crecen justo sobre el suelo con contacto parcial.
Riego por goteo en cultivos de alto crecimiento	4	Cultivos en los que las partes a cosechar no están en contacto con el suelo, como tomates.
Inactivación de patógenos por decaimiento	0.5-2 por día	Es la reducción del número de patógenos por decaimiento que ocurre entre el último riego y el consumo final. La meta en la remoción de unidades log depende de condiciones climáticas (temperatura, intensidad solar), tipo de cultivo, etc.
Lavado con agua	1	Lavado de hortalizas, vegetales y frutas con agua limpia.
Desinfección	2	Lavado de hortalizas, vegetales y frutas con una solución diluida de desinfectante y enjuague con agua limpia.
Pelado	2	Frutas y tubérculos.

**Fuente: (World Health Organization, 2006)**

**Tabla 5-3 Guías sugeridas para las aguas tratadas en el reuso agrícola y sus requerimientos de tratamiento**

Tipo de reuso agrícola	Tratamiento	Calidad
Reuso agrícola en cultivos que se consumen y no se procesan comercialmente	Secundario Filtración - Desinfección	pH = 6,5 – 8,4 DBO < 10 mg/L < 2 UNT < 14 NMP Coli Fecal / 100 mg/l < 1 Huevo / l
Reuso agrícola en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente	Secundario - Desinfección	pH = 6,5 – 8,4 DBO < 30 mg / l SS < 30 mg / l < 200 NMP Coli Fecal / 100 mg/l
Reuso agrícola en cultivos que no se consumen	Secundario - Desinfección	pH = 6,5 – 8,4 DBO < 30 mg / l SS < 30 mg / l < 200 NMP Coli Fecal / 100 mg/l

**Fuente: (FAO, 1999).**

La FAO también estableció las directrices para interpretar la calidad de las aguas de riego, estas directrices relacionan el grado de restricción de uso del agua de acuerdo con los parámetros de salinidad, infiltración y toxicidad de los iones específicos (Tabla 5-4). Previa a esta directriz, el departamento de agricultura de los Estados Unidos desarrolló la clasificación de agua para riego basada en la conductividad y la adsorción de sodio. Ambas directrices se refieren a los efectos a largo plazo de la calidad del agua sobre la producción del cultivo y las condiciones del suelo.

**Tabla 5-4 Directrices para interpretar la calidad de las agua de riego**

Problema potencial			Unidades	Grado de restricción de uso		
				Ninguno	Moderado	Severo
Salinidad (afecta la disponibilidad de agua para el cultivo)						
Conductividad eléctrica			dS-m <sup>-1</sup>	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0
Sólidos suspendidos totales			mg-l <sup>-1</sup>	< 450	450-2000	> 2000
Infiltración (evaluar usando a la vez CE y RAS)						
Relación adsorción / sodio (RAS)	0-3		dS-m <sup>-1</sup>	> 0.7	0.7-0.2	< 0.2
	3-6		dS-m <sup>-1</sup>	> 1.2	1.2-0.3	< 0.3
	6-12	Conductividad eléctrica (CE)	dS-m <sup>-1</sup>	> 1.9	1.9-0.5	< 0.5
	12-20		dS-m <sup>-1</sup>	> 2.9	2.9-1.3	< 1.3
	20-40		dS-m <sup>-1</sup>	> 5.0	5.0-2.9	< 2.9
Toxicidad de iones específicos (afecta cultivos sensibles)						
Sodio (Na)						
Riego por superficie			RAS	< 3	3-9	> 9
Riego por aspersión			meq-L <sup>-1</sup>	< 3	> 3	
Cloro (Cl)						
Riego por superficie			meq-L <sup>-1</sup>	< 4	4-10	> 10
Riego por aspersión			meq-L <sup>-1</sup>	< 3	> 3	
Boro (B)			mg-L <sup>-1</sup>	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0
Varios (afectan cultivos sensibles)						
Nitrógeno (N-NO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>			mg-L <sup>-1</sup>	< 5	5-30	< 30
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>						
Aspersión foliar únicamente			mg-L <sup>-1</sup>	< 1.5	1.5-8.5	> 8.5
pH					Rango normal 6.5-8.4	

**Fuente: (Ayers R y Wescot D, 1987)**

Efectos de toxicidad sobre los cultivos se han relacionado a la exposición de ciertos elementos en traza. Las concentraciones recomendadas de estos elementos en el agua para riego fueron desarrolladas por la agencia ambiental de los estados unidos en 1992 (Tabla 5-5).

**Tabla 5-5 Concentraciones recomendadas de elementos en traza en aguas para riego**

Elemento	Máxima concentración recomendada (mg/l)	Observaciones
Aluminio - Al	5.0	Causa toxicidad en suelos (< 5.5 pH) y precipitado del ión en suelos alcalinos
Arsénico - As	0,1	Tóxico para extensa variedades de plantas 12 mg/l para césped y 0.05 mg/l para arroz
Berilio - Be	0,1	Tóxico para extensa variedades de plantas 5 mg/l para la col y 0.5 mg/l para el frijol
Cadmio - Cd	0,01	Tóxico para el frijol en 0.1mg/l se acumula en el suelo y las plantas y puede ser perjudicial para los humanos
Cobalto - Co	0,05	Tóxico para plantas de tomate a 0.1 mg/l
Cromo - Cr	0,1	No es reconocido como un nutriente esencial
Cobre - Cu	0,2	Toxico para algunas plantas de 0.1 a 1.0 mg/l
Flúor - F	1.0	Inactivo en suelos neutros y alcalinos
Hierro - Fe	5.0	No es toxico para las plantas en suelos aireados, contribuye a la acidificación del suelo y reduce las concentraciones de fósforo y molibdeno
Litio - Li	2,5	Tolerado por algunos cultivos a mas de de 5 mg/l toxico para cultivos cítricos a > 0.075 mg/l

**Fuente: (Metcalf y Eddy, 2003).**

**Continuación Tabla 5-5**

Elemento	Máxima concentración recomendada (mg/l)	Observaciones
Manganeso - Mn	0,2	Toxico para algunos cultivos usualmente en suelos ácidos
Molibdeno - Mo	0,01	No toxico para las plantas en concentraciones normales del suelo y agua
Níquel - Ni	0,2	Toxico para las plantas de 0.5 a 1.0 mg/l
Plomo - Pb	5.0	Puede inhibir el desarrollo celular de la planta en altas concentraciones
Selenio - Se	0,02	Toxico para las plantas a concentraciones < 0.025 mg/l
Estaño - Sn	-	Excluido por las plantas
Titanio - Tn	-	Sin observaciones
Tungsteno - W	-	Sin observaciones
Vanadio - Va	0,1	Toxico para las plantas a concentraciones relativamente bajas
Zinc - Zn	2.0	Toxico para muchas plantas, reduce su toxicidad a pH > 6.0

**Fuente: (Metcalf y Eddy, 2003).**

En el contexto Colombiano no existe una directriz o guía que proponga valores de calidad permisibles para el reuso del agua residual. La normatividad vigente en la temática de reuso es la Ley 373 acerca del uso eficiente y ahorro del agua, que establece en su artículo 5 el reuso obligatorio (MAVDT, 1997b).

En el Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Salud se reglamentan los usos del agua y los residuos líquidos, donde se establecen los criterios de calidad admisible para la destinación del recurso en los diferentes usos. Para el uso agrícola los criterios admisibles son: “la concentración de boro deberá estar entre 0,3 y 4,0 mg/l, dependiendo del tipo de suelo y de cultivo; el NMP de Coliformes totales y fecales no deberá exceder de 5.000/100 ml y 1.000/100 ml, respectivamente, cuando se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto” (Ministerio de salud, 1984). Los criterios de calidad para la irrigación con aguas residuales en la agricultura dependen también del tipo de cultivo (restringido y no restringido), conforme a los lineamientos de la OMS (1989).

### **5.2.2 Tratamiento para reuso en agricultura**

En América Latina el máximo nivel de tratamiento de agua residual implementado es el nivel secundario, esto debido principalmente a los costos y criterios de vertimiento establecidos en la legislación de cada país. En Colombia se evidencia una situación similar. De acuerdo con la revisión realizada por Silva *et al.*, (2008) los principales sistemas de tratamiento en nuestro medio son las lagunas facultativas, los lodos activados y los tratamientos biológicos, considerados estos últimos como tratamiento secundario avanzado.

Desde el punto de vista de calidad microbiológica Blumenthal *et al.*, (2000) definieron que se debe realizar tratamiento terciario para el riego de cultivos que se consumen crudos, con base en esto, los sistemas de tratamiento convencionales implementados en Colombia no son aptos para este tipo de reuso. Sin embargo para la reutilización de agua residual en agricultura de cultivos que se procesan industrialmente, como la caña de azúcar, se



recomienda pretratamiento como lo exige el sistema de riego implementado y al menos una sedimentación primaria (Blumenthal *et al.*, 2000). Las principales características de los sistemas de tratamiento fueron analizadas por Silva *et al.*, (2008) y sus características se presentan en la Tabla 5-6, donde se establece el nivel de tratamiento apto para reuso de agua residual.

**Tabla 5-6 Características de los principales niveles de tratamiento**

Ítem	Nivel de tratamiento			
	Preliminar	Primario	Secundario	Terciario
Contaminantes removidos	Sólidos gruesos	Sólidos suspendidos sedimentables	Sólidos suspendidos	Contaminantes específicos
	Grasas	Materia orgánica suspendida	materia orgánica suspendida	Materia orgánica fina y soluble
	Acondicionamiento químico		Nutrientes: 15-50%	Nutrientes patógenos
			Patógenos	
Eficiencias de remoción	DBO: 0-5%	SS: 60-70%	SS: 60-99%	SS: >99%
	Coliformes: 0%	DBO: 30-40%	DBO: 60-99%	DBO: >99%
	Nutrientes: 0%	Coliformes: 30-40%	Coliformes: 60-99%	Coliformes: >99,9%
		Nutrientes: <20%	Nutrientes: 15-50%	Nutrientes: >90%
Mecanismo predominante	Físico	Físico	Biológico o químico	Biológico o químico
Cumple patrón de vertimiento	No	No	Usualmente si	Si
Cumple patrón de reuso	No	No	Usualmente si	Si

**Fuente:** (Silva *et al.*, 2008).

### 5.2.3 Experiencias internacionales de reuso

La reutilización del agua residual en agricultura es una práctica tradicional en ciertos países, particularmente en China, India, Indonesia y Vietnam. Dos de las experiencias más grandes del mundo son el Valle Mezquital en México y la práctica acuicultura en Calcuta, India (Siebel y Gijzen, 2002).

El Valle Mezquital representa el área más grande del mundo irrigada con aguas residuales, se encuentra localizado en la alta meseta mexicana. Presenta un ejemplo único de la irrigación con aguas residuales debido a su inmensa área cultivada (83.000 ha) y su historia de casi 100 años. Estas aguas residuales no han recibido ningún tratamiento convencional y son transportadas por canales. Se irrigan cultivos de alfalfa, maíz, habas, avena, tomate, ají y remolacha. Una cierta porción de cultivos restringidos por la normatividad local mexicana también son irrigados, lechuga, col, zanahoria, espinaca y rábano. Las aguas residuales del área metropolitana de ciudad de México son altamente valoradas por los agricultores de la región debido a que mejoran la calidad del suelo y por sus cargas de nutrientes. Sin embargo, debido a su origen doméstico e industrial, contienen patógenos y productos químicos tóxicos que constituyen un riesgo para la salud de agricultores y consumidores. Los análisis de Coliformes fecales en depósitos del Valle indican que estos

valores son de 102 a 104 más altos que las pautas de la OMS para la reutilización del agua residual en agricultura (Siebel y Gijzen, 2002)

Uno de los países con mayor utilización de aguas residuales es Israel, debido a los problemas de escasez que este presenta. El 10% del consumo total de agua en este país corresponde a reutilización de aguas residuales. En la ciudad de Arad se han realizado evaluaciones de la contaminación de suelos por esta práctica, donde se identificó una alta remoción de microorganismos patógenos en el suelo, así mismo se mostró una buena correlación entre la reducción de indicadores fecales, el contenido de materia orgánica y el pH (Campos *et al.*, 2000) citado en Silva (2008).

Brasil es uno de los países con diversas experiencias de utilización de agua residual, no solo en agricultura sino en uso urbano e industrial. La estación experimental *Jesus Netto*, en Sabes ocupa un área de 12.300 m<sup>2</sup> y trata 60 l/s de efluentes sanitarios por medio de dos sistemas de tratamiento que operan en paralelo, uno por lodos activados y el otro por reactor anaerobio de flujo ascendente. De esta estación son reutilizados 20 l/s para la industria Coats Corrente, esta fue la primera iniciativa de reuso desarrollada a escala piloto y posteriormente a escala real gracias al compromiso de la comunidad. Su permanencia a lo largo del tiempo muestra la viabilidad técnica de este tipo de aplicaciones (Filho, 2003).

En agricultura de Brasil se mencionan diversas experiencias. En el estado de Paraíba se evaluaron los efectos de un suelo irrigado con agua residual tratada con filtros de arena, comparado con el manejo de agricultura convencional en un cultivo de café, se evidenciaron problemas de salinidad por el incremento de iones como sodio, la conductividad eléctrica y el RAS. Sin embargo la aplicación del agua residual filtrada mejoró las características del suelo aumentando el pH, materia orgánica, potasio, calcio y magnesio (Medeiros, 2005).

En Populina, localidad del estado de São Paulo, se realiza el riego de agua residual para la producción de gramíneas para alimentación animal, este uso se caracteriza como reuso no potable. El sistema de tratamiento evaluado consiste en la capacidad del suelo como tratamiento a través de cuatro módulos de riego que posteriormente colectan los excedentes y se disponen al río. Los principales efectos del riego con agua residual sobre el suelo evidencian un aumento de materia orgánica en los primeros 15 cm, mejorando consecuentemente su estructura. El uso de agroquímicos se redujo debido al aporte de carga orgánica del agua residual. Se identificaron impactos negativos en la salinidad del suelo (da Silva, 2003).

Dado que la utilización de agua residual tiene un impacto, no sólo en términos de salud pública, sino en aspectos sociales, culturales, normativos y económicos; entidades como la Organización Mundial para la Salud -OMS, el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente -PNUMA, el Centro de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos -HABITAT, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación -FAO y el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente -CEPIS; han enfocado sus esfuerzos para investigar acerca del potencial del reuso del agua,

generando guías, lineamientos y proyectos, como los descritos anteriormente (Helmer y Hespanhol, 1999).

Una de las experiencias más sobresalientes en Latinoamérica acerca de evaluación de potencial del reuso de agua residual en la agricultura, fue el proyecto “Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial”, desarrollado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente - CEPIS en convenio con el Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo –IDRC y Organización Panamericana para la Salud -OPS (Moscoso y Young, 2002).

Este proyecto consistió en estudiar las experiencias en tratamientos de agua residual doméstica y su uso en la agricultura urbana con el fin de recomendar estrategias de diseño e implementación (Lorenzo *et al.*, 2009). Dichas recomendaciones proponen un modelo de sistema integrado de tratamiento y uso de aguas residuales domésticas para producción agrícola, priorizando la remoción de patógenos para proteger la salud pública. En la tercera etapa del proyecto se realizaron estudios de viabilidad en países como: Guatemala, Perú, Venezuela, Costa Rica, Colombia y Brasil (Moscoso y Young, 2002)

#### **5.2.4 Experiencias locales de reuso en agricultura - Colombia**

Como caso de estudio del proyecto de sistemas de tratamiento integrado para reuso de agua residual en agricultura descrito anteriormente, en Ibagué-Colombia se evaluó la viabilidad de una propuesta para uso productivo, la cual contemplaba el reuso de las aguas residuales provenientes de lagunas facultativas con tratamiento preliminar y primario. La planta de tratamiento trataba alrededor de 1.439 l/s. Uno de los logros más sobresalientes de esta experiencia fue la vinculación del Ministerio de Medio Ambiente de Colombia y el Ministerio de Desarrollo Económico, que contribuyó a la documentación de un proyecto de Ley sobre la reutilización del agua (Vanegas, 2002), evidenciando así, la integralidad del modelo propuesto.

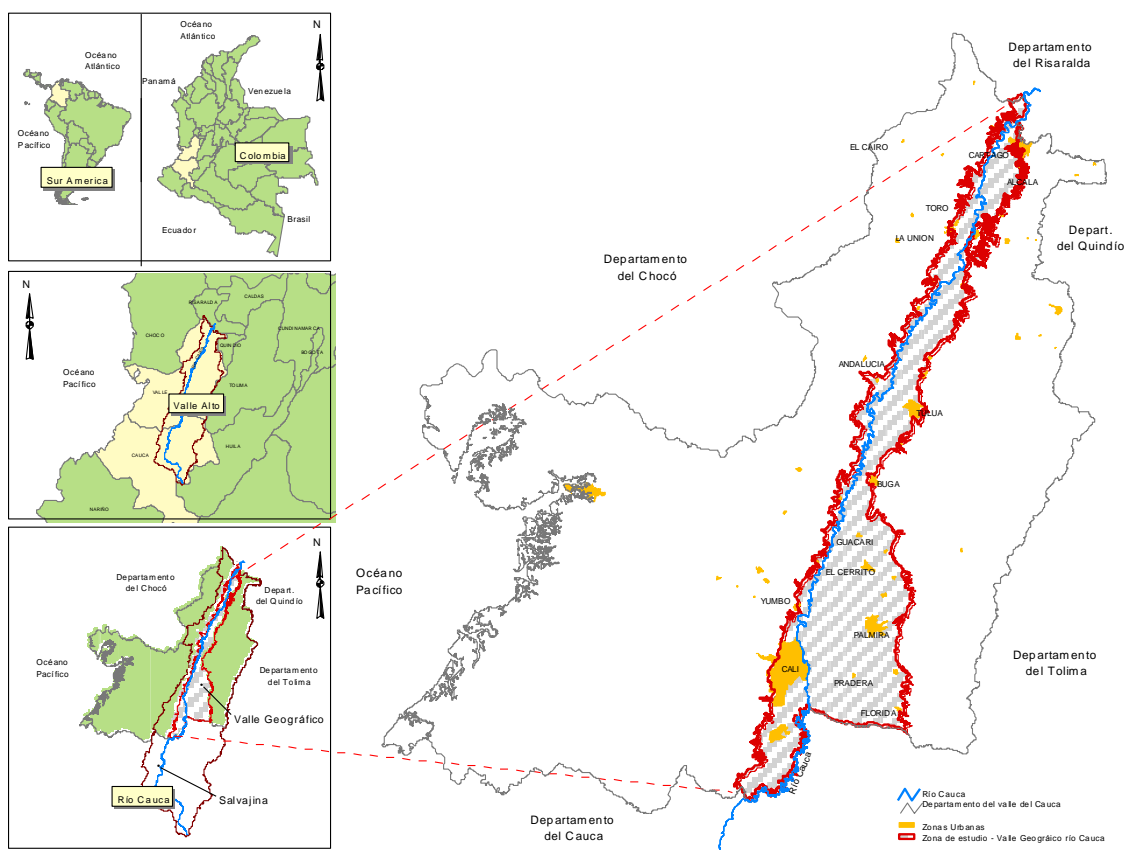
Otras experiencias específicas en la zona de estudio, han sido desarrolladas por el instituto CINARA de la Universidad del Valle, que ha evaluado a nivel teórico y experimental la potencialidad del reuso de agua residual doméstica para el riego de cultivos restringidos. Estas investigaciones han demostrado que existe potencial de reutilización del agua residual desde el punto de vista de la calidad microbiológica y agrológica (Madera, 2003; Silva *et al.*, 2008; Valencia, 1998).

Una de estas experimentaciones consistió en evaluar el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveral (PTAR-C) para el riego de un cultivo de caña de azúcar. En este estudio se emplearon dos calidades del efluente tratado bajo las modalidades de tratamiento primario convencional (TPC) y avanzado (TPA) y agua de pozo como testigo. Los resultados mostraron que tanto los efluentes tratados por TPC y TPA como el agua pozo, son potencialmente utilizables para el riego de caña de azúcar

desde el punto de vista de la calidad agronómica y metales pesados (Silva, 2008). Por su parte, Osorio (2006) realizó una evaluación teórica de opciones de oferta de agua para riego de cultivos en distritos agroalimentarios proyectados en el Valle del Cauca, tomando como caso de estudio el distrito agroalimentario de Palmira. Los resultados reafirman la viabilidad del uso de las aguas residuales domésticas para riego agrícola, en términos de disponibilidad y control de impacto por las actividades citado en: (Silva *et al.*, 2008).

## 6 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el recorrido del río Cauca a lo largo del país se identifican claramente cuatro tramos: Alto Cauca, Valle Alto, Cañón del Cauca o Cauca Medio y Bajo Cauca (Sandoval y Ramírez, 2007). La zona de estudio para esta investigación corresponde al Valle Geográfico del río Cauca, considerada como zona plana del tramo Valle Alto, en el departamento del Valle del Cauca (Figura 6-1).



**Figura 6-1 Localización general de la zona de estudio**  
Elaboración propia basado en (CVC y FAL, 1998)

En la zona de estudio, los recursos naturales agua y suelo se utilizan principalmente para la agricultura (Tabla 6-1) y (Figura 6-2). El uso predominante del suelo es el cultivo de Caña de azúcar con un porcentaje de 53% respecto al total del área seguido de pastos (19%) y zonas urbanas (8%). Asociado a la utilización del agua, se han realizado estudios de determinación del índice de escasez en las subcuencas de los ríos que tributan a la fuente principal (río Cauca). Este índice es la relación entre la oferta y la demanda de agua del río tributario y refleja la presión que se ejerce sobre el recurso hídrico superficial en la

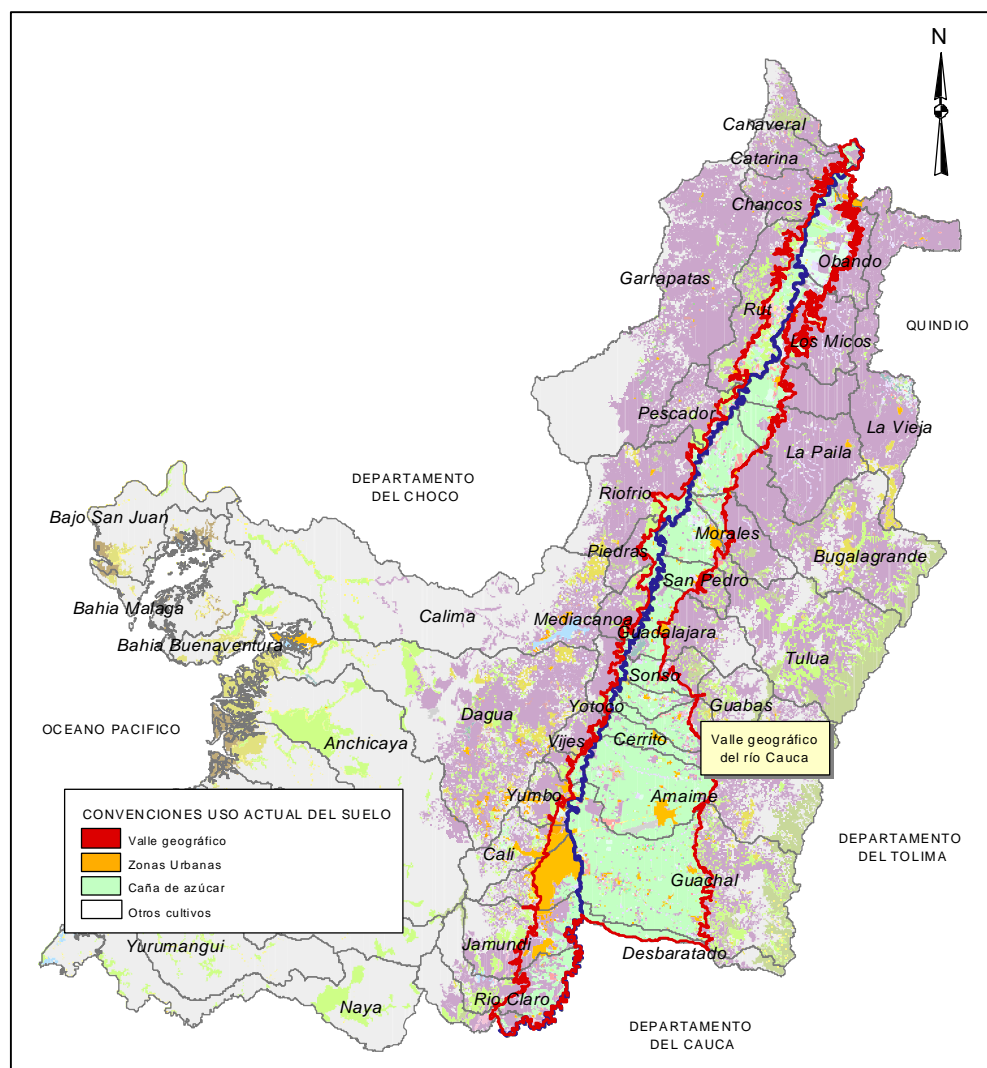
subcuenca, no se consideran otras demandas como el río Cauca o agua subterránea. Los resultados determinaron que 22 de las 37 subcuencas tributarias al río Cauca presentan un índice de escasez alto, 11 subcuencas índice de escasez medio-alto y cuatro de ellas sin información alguna (Sandoval y Soto, 2009) (Figura 6-3).

**Tabla 6-1 Uso del agua en el Valle geográfico del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca.**

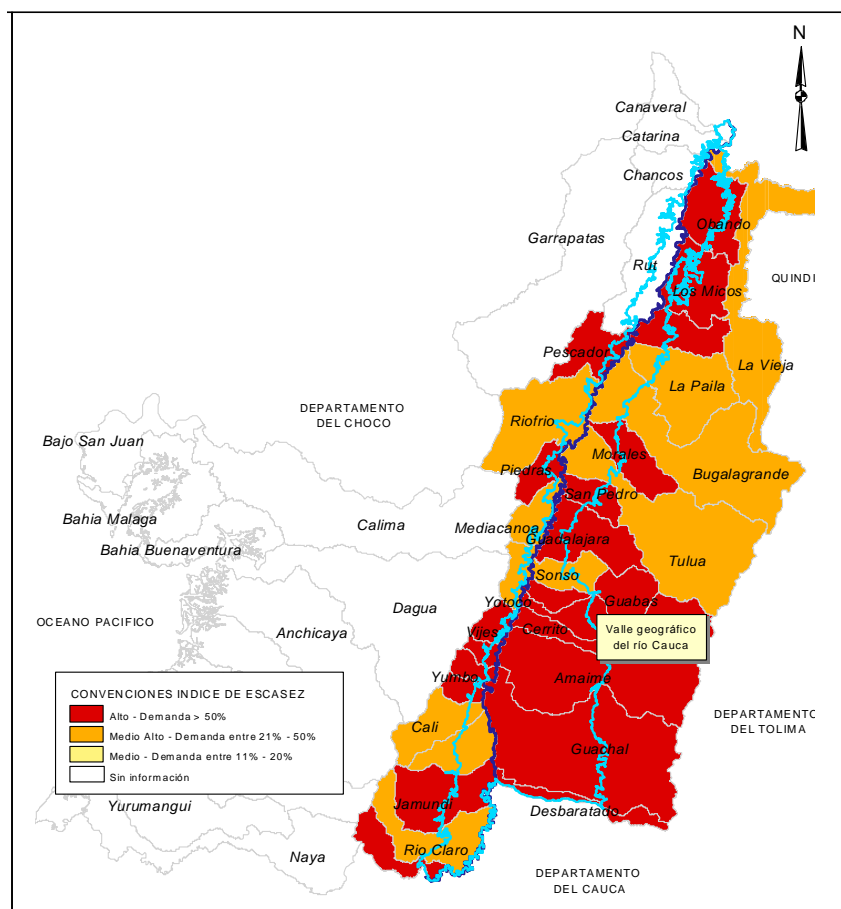
Uso	Agua Superficial*		Agua Subterránea**	
	Cantidad (m <sup>3</sup> /s)	%	Cantidad (m <sup>3</sup> /s)	%
Agrícola	119,2	80	76	95
Industrial	13,41	9	0,8	1
Doméstico	16,39	11	3,2	4
Total	149	100	80	100

\* Cantidad de agua asignada por la CVC hasta el año 2009. \*\* Cantidad de agua utilizada en el año 2009.

Fuente: (CVC, 2010)



**Figura 6-2 Usos del suelo en el Valle del Cauca.**  
Elaboración propia basado en (CVC, 2006c)



**Figura 6-3 Índice de escasez en cuenca del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca.**  
Elaboración propia basado en (Sandoval y Soto, 2009)

Asociado a la utilización del agua, se han realizado estudios de determinación del índice de escasez en las subcuencas de los ríos que tributan a la fuente principal (río Cauca). Este índice es la relación entre la oferta y la demanda de agua del río tributario y refleja la presión que se ejerce sobre el recurso hídrico superficial en la subcuenca, no se consideran otras demandas como el río Cauca o agua subterránea. Los resultados determinaron que 22 de las 37 subcuencas tributarias al río Cauca presentan un índice de escasez alto, 11 subcuencas índice de escasez medio-alto y cuatro de ellas sin información alguna (Sandoval y Soto, 2009) (Figura 6-3).

En la actualidad, 10 de las 33 cabeceras municipales del valle geográfico cuentan con algún sistema de tratamiento de aguas residuales. Para el año 2007, el total de carga contaminante de DBO<sub>5</sub> aportada al río Cauca por los municipios fue de 124.301 kg/día, del cual el 36% (44.215 kg/día) fue tratado y vertido al río, el 64% (80.066 kg/día) restante fue vertido al río sin tratamiento alguno (CVC y Universidad del Valle, 2009). El municipio de Cali es el mayor aportante de la contaminación puntual en la zona de estudio, el total de la carga aportada por este municipio luego de ser realizado el tratamiento primario avanzado en la PTAR-C fue de 42.588 kg/d (Tabla 6-2).

**Tabla 6-2 Carga de DBO<sub>5</sub> aportada por el municipio de Cali al río Cauca en el año 2007**

Información	Carga de DBO <sub>5</sub>
	(kg/d)
Valor promedio de carga de DBO <sub>5</sub> producida por la ciudad de Cali en el año 2007	101.129
Valor promedio de carga de DBO <sub>5</sub> vertida por la ciudad de Cali sin tratamiento	33.253
Valor promedio de carga de DBO <sub>5</sub> vertida por la ciudad de Cali con tratamiento	42.588

**Fuente: (CVC y Universidad del Valle, 2009)**

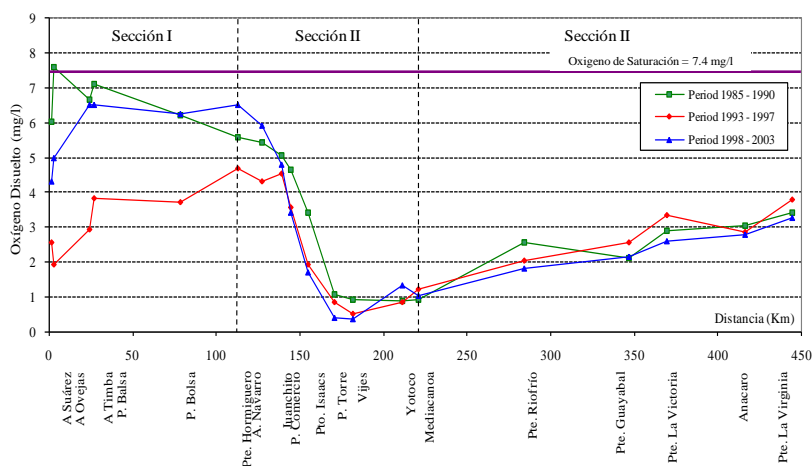
De acuerdo con la tendencia histórica, Cali aporta el 38% de la carga contaminante, el aporte de los 32 municipios restantes es del 34%, el sector agroindustrial de la caña de azúcar aporta el 2% del total de la carga puntual contaminante. Los efectos de la contaminación no puntual o difusa por el uso de fertilizantes, agroquímicos u otras sustancias que generar contaminación en el cauce principal no son registrados en la Tabla 6-3 (CVC, 2006b)

**Tabla 6-3 Aportes de carga contaminante puntual DBO<sub>5</sub> (ton/día) al río Cauca. Mediciones realizadas en 2000-2004.**

Sector / Año	2000	2001	2002	2003	2004
Cali	99,00	104,00	104,00	81,60	87,85
Ingenios Azucareros	5,40	5,50	4,20	5,61	6,05
Cafeteros	11,40	7,60	7,60	10,24	26,43
Otros Municipios	56,50	49,60	50,40	68,00	72,49
Otras Industrias	51,60	51,60	50,30	55,00	34,84
Papeleras	5,60	5,10	2,90	4,39	14,60
TOTAL	229,51	223,40	219,40	224,84	242,26

**Fuente: (Duque, 2005)**

En relación a la calidad del recurso hídrico en el valle geográfico del río Cauca, se observa el impacto de las descargas de agua residual municipal en el cauce principal. Del análisis de Oxígeno Disuelto (DO) en los muestreos realizados en las 19 estaciones en el río Cauca entre Salvajina y La Virginia, se evidencia el decremento de esta condición en diferentes periodos históricos (Figura 6-4).



**Figura 6-4 Variación del OD en el río Cauca bajo condiciones de invierno-verano-transición**

**Fuente: (Sandoval y Ramírez, 2007)**



## 7 METODOLOGÍA

La caracterización de la investigación corresponde a un estudio de tipo *prospectivo, transversal, descriptivo, observacional* y por tanto no se condicionó al diseño experimental tradicional (Mendez, 1991). Por el alcance de sus resultados se considera que ésta investigación fue realizada a nivel exploratorio, dado aporta una metodología para la identificación del potencial de reuso de agua residual doméstica en agricultura el marco de la sostenibilidad, lo que hasta el momento no se ha concebido en el contexto local evaluado. La metodología desarrollada para esta investigación se estructuró en tres fases, cada una de ellas corresponde con el alcance de los objetivos planteados (Figura 7-1).

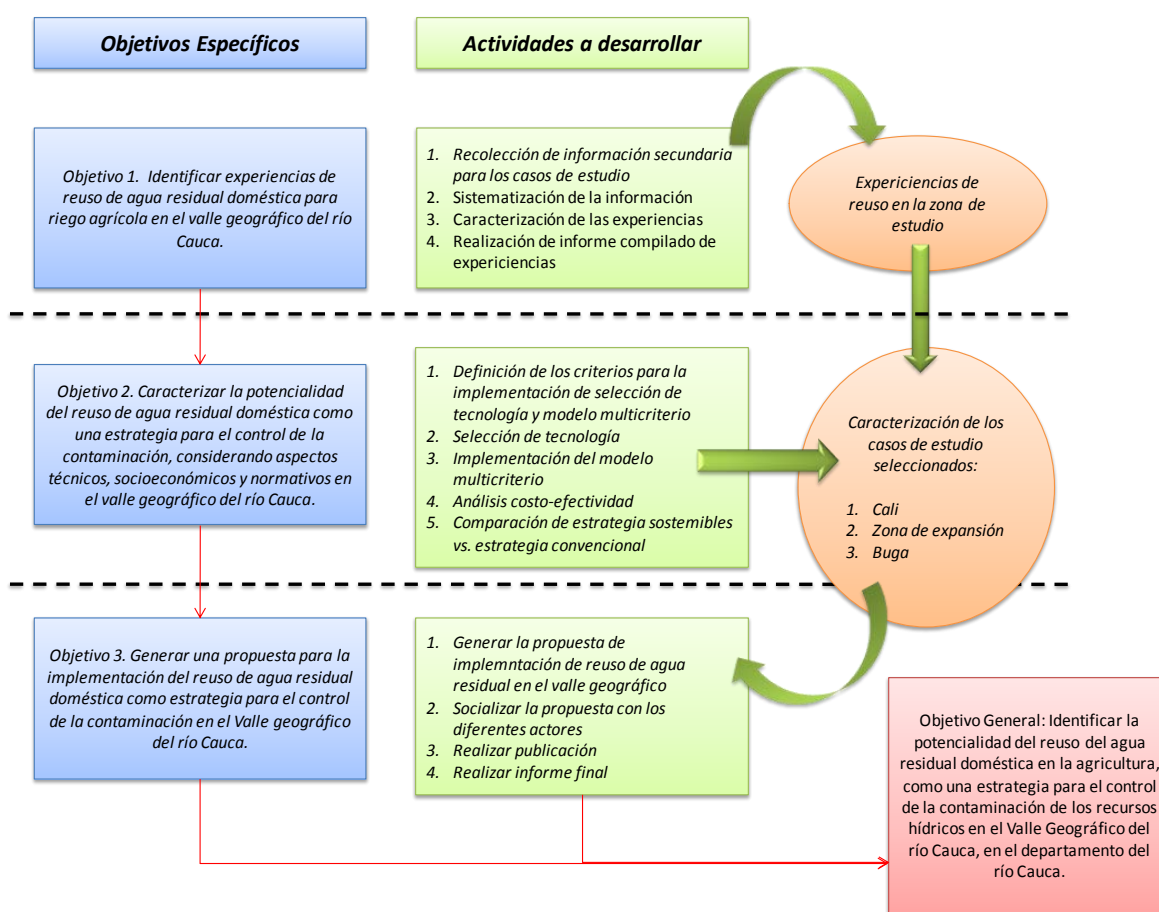


Figura 7-1 Diagrama metodológico de la investigación desarrollada.

## **7.1 Fase I. Identificación de experiencias de reuso de agua residual doméstica para riego agrícola en el valle geográfico del río Cauca.**

La identificación de las experiencias de reuso de agua residual doméstica para riego agrícola fue abordada desde el sector municipal, dado que éste aporta el 72% de la carga contaminante puntual al río Cauca, cuerpo hídrico receptor de la zona de estudio (CVC, 2006b) (Duque, 2005). Las experiencias documentadas fueron obtenidas apartir de la revisión de literatura efectuada a los instrumentos de comando y control ejecutados por las autoridades ambientales de la zona de estudio, como son los Programas de Sanaamiento y Manejo de Vertimientos y la Reglamentación de Fuentes Hídricas Superficiales.

El primer instrumento presenta el manejo actual del agua residual de cada municipio, lo cual permitió, con validación de la CVC y el DAGMA, conocer el caudal de agua residual generado y tratado por cada municipio, el uso posterior del agua residual, la caracterización de la calidad del agua residual generada y vertida a los cuerpos hídricos receptores, además de los puntos de vertimiento del agua residual tratada y no tratada por los municipios.

El segundo instrumento, presenta el inventario actual de los usuarios de agua de una fuente hídrica superficial, los usos respectivos del recurso hídrico y la localización de los puntos de toma de agua. Con implementación de software de sistema de información geográfica fue posible integrar la información obtenida de los instrumentos señalados anteriormente y esto permitió caracterizar las experiencias de reuso de acuerdo a la clasificación dada por (Lavrador Filho, 1987).

Para la recopilación de las experiencias de reuso de agua residual doméstica en agricultura, se diseñó una base de datos compuesta de 43 atributos (Anexo 1). El manejo de la base de datos se realizó con la implementación del software ARCGIS 9.2 y esto permitió generar el mapa de localización de las experiencias de reuso de agua residual doméstica en agricultura. Cada atributo o variable de la base de datos presenta una tipología y longitud conforme a la operación del software empleado.

Una vez sistematizadas las experiencias de reuso de agua residual doméstica en agricultura se realizó el análisis de los resultados mediante estadística descriptiva, que permitió cuantificar el número de experiencias de reuso directo o indirecto y conocer el caudal de reutilización en el sector agrícola en la zona de estudio. Con la caracterización de la calidad del vertimiento de agua residual doméstica de cada municipio, fue posible identificar si la práctica de reuso agrícola se efectúa conforme a los lineamientos internacionales y la normatividad local, esto se realizó por medio de comparación con los estándares de calidad propuestos por la FAO en 1987 para la interpretación de la calidad de agua de riego (Figura 7-2).

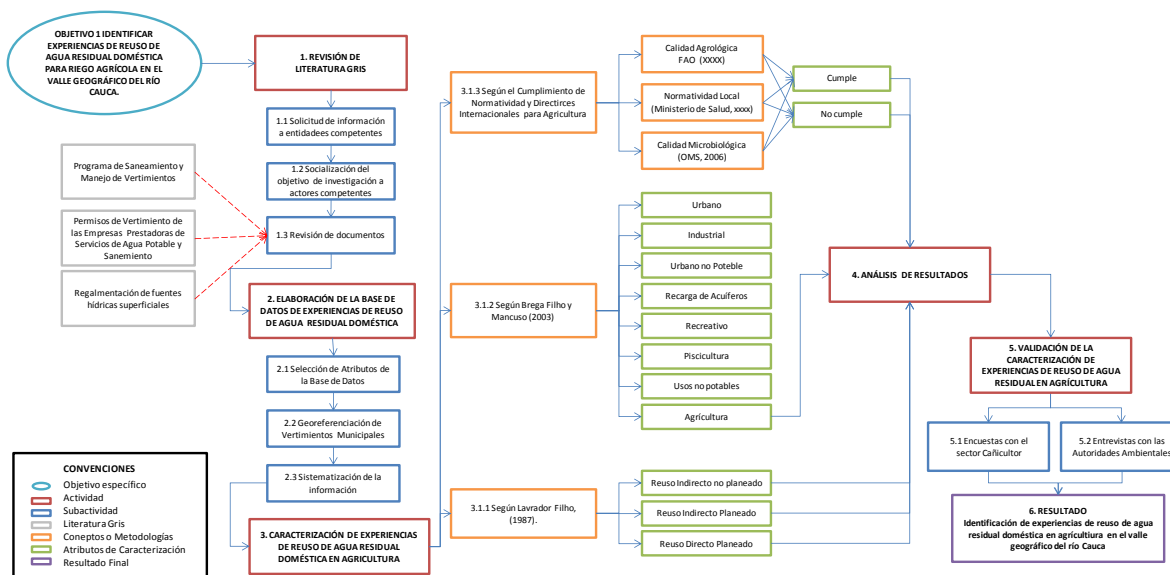


Figura 7-2 Esquema metodológico de la Fase I. de investigación

Para la validación de ésta fase del proyecto de investigación, se realizó un taller participativo de socialización de los resultados con las autoridades ambientales de la zona de estudio (CVC y DAGMA) y entrevistas a los 12 ingenios azucareros de la región para validar la georeferenciación de los puntos de toma de agua para riego (Anexo 2).

## 7.2 Fase II. Caracterización de la potencialidad del reuso de agua residual doméstica como una estrategia para el control de la contaminación, considerando aspectos técnicos, socioeconómicos y normativos en el valle geográfico del río Cauca.

La metodología para la caracterización del potencial del reuso de agua residual doméstica, emplea a manera de eje central la evaluación socioeconómica como herramienta de análisis, dado que ésta permite identificar la potencialidad, o la viabilidad, de cualquier propuesta de solución en contraste con una solución ya implementada o una situación sin intervención frente a una problemática dada (Miranda, 2000). La evaluación socioeconómica consideró no solo los aspectos financieros, ambientales y técnicos sino, aspectos culturales, como la percepción de la comunidad frente al reuso, aspectos institucionales como la posición de las empresas prestadoras del servicio frente a la inversión de unidades de tratamiento adicionales a las estructuradas para el cumplimiento de la normatividad ambiental colombiana, y aspectos socioeconómicos como la identificación de beneficios por ahorro en fertilización, ahorro en operación de sistemas de riego convencionales y ahorro en pago de instrumentos económicos ante la autoridad ambiental; todo lo anterior enmarcado en los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad.

Debido a esto es importante establecer a priori, que el proceso de evaluación implementado se fundamenta en la comparación de dos alternativas de solución y es por esta razón que metodológicamente se comparó el manejo actual del agua residual realizado en cada caso de estudio (que se denomina *Solución convencional*) con la implementación de reuso de agua residual doméstica como una *Solución Alternativa*. Por tanto las etapas que comprendieron la Fase II de ésta investigación son:

a. Caracterización del municipio caso de estudio: Se realizó con base en información gris, relacionada en documentos institucionales, consultorías y documentos académicos. La descripción de cada caso de estudio incluyó la localización geográfica de los sistemas de tratamiento y los puntos de vertimiento del efluente de estos sistemas, descripción del manejo actual del agua residual, consultado participativamente con las empresas prestadoras del servicio mediante entrevistas y con la recopilación de literatura gris (planes de saneamiento y manejo de vertimientos). Además se recopiló la información del manejo de los recursos naturales en el área de influencia del caso de estudio, como son: uso actual del suelo, tenencia de tierras, sistema hídrico superficial y subterráneo, a través de información cartográfica suministrada por las autoridades ambientales.

El análisis de esta información se realizó a través de análisis de frecuencia de datos y estadística descriptiva. La información cartográfica relacionada, se considera como temática, por tal motivo se tomó como única base la información suministrada por la autoridad ambiental del caso de estudio, que presenta un soporte técnico y levantamiento estandarizado dentro de los protocolos de cada una de las instituciones.

b. Descripción de la *solución convencional* para el manejo del agua residual doméstica: Se realizó con base en la revisión de los programas de saneamiento y manejo de vertimientos de los municipios caso de estudio. Estos programas de manejo contienen el plan de inversiones que las empresas prestadoras de servicios públicos deben ejecutar en el mediano y largo plazo, con lo cual fue posible caracterizar además los costos de la solución convencional en el manejo del agua residual doméstica.

c. Descripción de la *Solución Alternativa* para el manejo del agua residual doméstica: Para cada uno de los casos de estudio seleccionados (municipios de Cali, Buga y zona de expansión de Cali), se han desarrollado alternativas de manejo de las aguas residuales considerando reuso en agricultura en el marco diversos proyectos de investigación como SWITCH, liderado a nivel internacional por UNESCO-IHE y coordinado por el Instituto CINARA; en el caso particular del municipio de Cali, con base en el proyecto de investigación “Estudio de evaluación de la potencialidad del reuso para la agricultura del efluente de la PTAR-C” del grupo de investigación “Estudio y control de la contaminación ambiental” de la Universidad del Valle, y en el caso del municipio de Buga través del estudio de selección de tecnología y predimensionamiento hidráulico del sistema de tratamiento para las aguas residuales, desarrollado por el Instituto CINARA y la CVC.

De las alternativas de tratamiento de agua residual para reuso en agricultura evidenciadas en los diferentes estudios, se realizó un proceso de selección de tecnología de tratamiento

de agua residual, implementando análisis multicriterio, esto permitió identificar la *Solución Alternativa*, con la cual se realizaron los comparativos en la evaluación del potencial de reuso agrícola.

Para la selección de la tecnología de tratamiento de agua residual de cada caso de estudio, se empleó el análisis correlacional gris (Zeng *et al.*, 2007), donde se definieron los criterios de selección y por cada criterio se identificaron indicadores de efectividad. Este análisis permitió jerarquizar las alternativas a seleccionar de acuerdo con la ponderación de los criterios empleando la matriz de comparación de Saaty (Romero, 1997; Zeng *et al.*, 2007) y permitió la selección de alternativas de reuso de agua residual en el marco de la sostenibilidad del sistema (Restrepo, 1998).

Los criterios e indicadores de efectividad fueron considerados con base en la consulta realizada a 25 expertos nacionales e internacionales, donde fue posible, mediante análisis de frecuencia, identificar el peso ponderado de cada uno de los criterios y el peso ponderado cada indicador (Anexo 3).

Asociado la implementación del reuso de agua residual doméstica como una estrategia para el control de la contaminación hídrica, se determinó el plan agrícola para cada caso de estudio, con esto fue posible identificar las áreas y los caudales de riego con agua residual doméstica tratada. En primera instancia se determinó la existencia de una verdadera demanda de agua para riego en la zona perimetral de cada caso de estudio, lo cual se realizó con base en la determinación del balance hídrico, considerando frecuencias y eficiencias de los sistemas de riego y el requerimiento hídrico de los cultivos. El balance hídrico se realizó por método de balance simplificado (Sokolov y Chapman, 1981) y considerando que los datos de precipitación y evaporación de las estaciones climatológicas en la zona de estudio ya que estas presentan análisis exploratorio de datos y análisis estadístico unidimensional (CVC, 2006a).

El balance hídrico permitió definir la temporalidad de reutilización del agua y las áreas de riego, las cuales fueron correlacionadas geográficamente con las zonas de baja vulnerabilidad del acuífero del valle geográfico del río Cauca, con lo cual se determinó el área potencial para riego con los efluentes de los sistemas de tratamiento propuestos en la *Solución Alternativa*, sin ocasionar riesgo de contaminación a las reservas de agua subterránea.

La determinación de zonas de baja vulnerabilidad ya ha sido evaluada mediante la metodología GOD y GODS (Foster *et al.*, 2003) y avalada con estudios de vulnerabilidad para el acuífero del Valle del Cauca (CVC, 1999; Ríos y Velez, 2008). La correlación cartográfica se realizó con el sistema de información geográfico ArcView 3.2 a través de álgebra de mapas.

d. Potencialidad del reuso agrícola con agua residual doméstica tratada: La viabilidad financiera de cada caso de estudio se realizó con base a la situación incremental de la práctica de reuso en agricultura y se implementó la metodología de evaluación

socioeconómica descrita por Miranda (2000). La situación incremental se define como las inversiones adicionales en unidades de tratamiento, sistemas de transporte de agua residual tratada hacia los cultivos, talleres y jornadas de capacitación a los diferentes actores, y todas aquellas actividades que no se realizarían de manera convencional en el tratamiento de agua residual.

La obtención de la información para el análisis financiero se realizó con base en los precios del mercado y el análisis de esta información se ejecutó con análisis de frecuencia. Para el procesamiento de esta información, se diseñaron bases de datos en Excel. Los indicadores financieros que permitieron identificar la viabilidad del reuso de agua residual en agricultura en cada caso de estudio, fueron: la eficiencia económica en función del valor presente neto de los costos de implementación del reuso y los beneficios estimados, y la relación beneficio / costo.

Para determinar la potencialidad de reuso mediante la evaluación socioeconómica se consideraron tres etapas: 1) Identificación de impactos negativos y costos adicionales atribuidos a la implementación de la práctica de reuso. 2) Identificación de beneficios. 3) Análisis socioeconómico (Miranda, 2000). Dentro de la identificación de beneficios se consideraron los ahorros por pago de instrumentos económicos ante la CVC (decreto 155 de 2006 y decreto 3100 de 2003), ahorros por importe de fertilizantes y ahorro en construcción, operación y mantenimiento de sistemas de abastecimiento de agua para riego (pozos).

El análisis socioeconómico se realizó sin considerar las razones precio-cuenta para Colombia determinadas por el Departamento Nacional de Planeación, debido al proceso de desglose de cada una de las actividades que se consideraron en la identificación de los costos. Se considera como recomendación a priori a los resultados de este proyecto continuar con el proceso de evaluación socioeconómica considerando las relaciones precio cuenta, que permiten perfeccionar los precios de mercado.

e. Viabilidad ambiental del impacto del reuso de agua residual doméstica en el control de la contaminación hídrica: En la evaluación ambiental se analizó el impacto de los vertimientos con agua residual tratada en el río Cauca, cuerpo hídrico receptor de los tres casos de estudio. En el desarrollo del proyecto de modelación del río Cauca en el año 2007 se implementó el paquete de modelación MIKE11 y se generó el escenario base para la modelación de la calidad de esta fuente. Con base a esto se realizaron las corridas del modelo considerando las caracterizaciones de los efluentes de los sistemas de tratamiento implementado reuso, lo cual permitió simular las condiciones de calidad del cuerpo receptor, identificando así un impacto en el control de contaminación de los cuerpos hídricos por implementación del reuso de agua residual. Los resultados de esta modelación fueron graficados y comparados con el escenario base. Se debe considerar que el modelo se encuentra calibrado.

De acuerdo con el alcance de la investigación (nivel exploratorio), la evaluación del potencial del reuso de agua residual en agricultura descrita anteriormente por etapas, fue

implementada en tres casos de estudio representativos de los municipios del valle geográfico del río Cauca. Los casos de estudio seleccionados fueron: 1) Municipio de Cali, por ser representativo de municipios con más de 1'000.000 de habitantes y poseer un sistema de tratamiento de agua residual centralizado. 2) Municipio de Buga, por ser representativo de municipios con poblaciones de mediano tamaño, entre 100.000 y 400.000 habitantes y no poseer en la actualidad sistema de tratamiento de agua residual y 3) La zona de expansión sur de Cali, por ser representativa de zonas de futuro desarrollo, esto permitió evaluar la potencialidad de la práctica del reuso de agua residual desde la planeación (Figura 7-3).

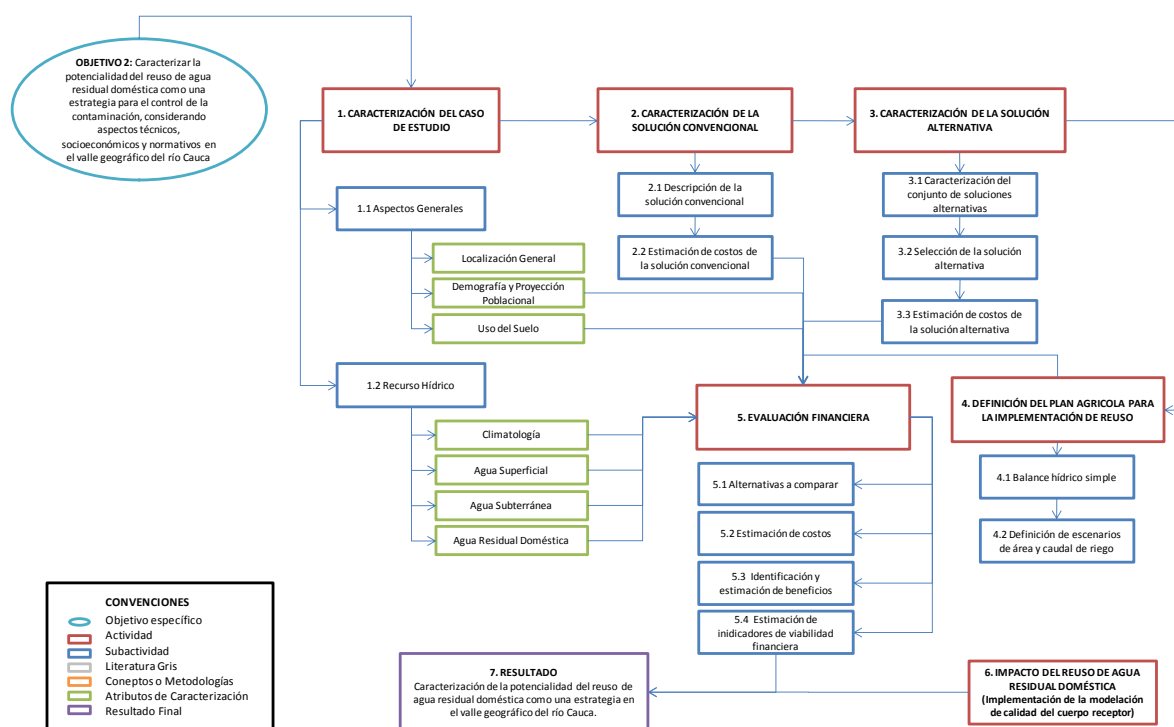


Figura 7-3 Esquema metodológico de la Fase II de investigación

### 7.3 Fase III. Generación de una propuesta para la implementación del reuso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación en el Valle geográfico del río Cauca.

Con base en los resultados obtenidos en las fases I y II del proyecto, se elaboró la propuesta de implementación del reuso agrícola con agua residual doméstica para el control de la contaminación de los cuerpos hídricos. Esta propuesta consta de tres etapas. La primera de ella propone la metodología realizada en esta investigación para estimar los costos del agua residual tratada considerando los aspectos fundamentales de la sostenibilidad. Esta propuesta se enlaza con la determinación del Índice de escasez, instrumento elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, y permite relacionar el

nivel o grado de escasez de agua en una cuenca hidrológica determinada. La propuesta de estimación del costo del agua residual con este instrumento consistió en la identificación de las cuencas con grado de escasez alto y establecer el reuso como una fuente abastecedora en las actividades de riego.

La segunda fase de esta propuesta consistió en articular la implementación del resuso de agua residual doméstica con tres instrumentos de comando y control determinados en la política hídrica colombiana, que son: Los planes de saneamiento y manejo de vertimientos, los programas de uso eficiente y ahorro del agua (Ley 373 de 1997) y la reglamentación de fuentes hídricas superficiales. Estos instrumentos recomiendan el uso eficiente, pero no presentan una propuesta de implementación o estimación de la potencialidad de esta práctica, lo cual fue propuesto en esta fase del proyecto desarrollado y con base en la metodología de evaluación socio económica implementada.

La última fase de esta propuesta presenta a los usuarios de agua para riego las consideraciones que deberán tenerse en cuenta para la implementación de este recurso alternativo, como las asociaciones de usuarios que deben conformarse para ser beneficiarios directos del agua residual tratada, los convenios institucionales que debe realizarse entre el prestador del servicio y los usuarios de riego y el marco normativo que ampara este tipo de actuaciones.

Como herramienta metodológica implementada para esta fase del proyecto de investigación se realizó la revisión de literatura del contexto normativo colombiano asociado a los instrumentos de comando y control de la política hídrica y la conformación de asociaciones de usuarios. Para la validación de la propuesta elaborada se realizó un taller de socialización de los resultados ante las autoridades ambientales de la zona de estudio, las empresas prestadoras de servicios públicos y los principales usuarios del agua para riego en la zona (ingenios azucareros).



## 8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1 Identificación de experiencias de reuso de agua residual doméstica para riego en el valle geográfico del río Cauca

Las experiencias de reuso de agua residual doméstica para riego en el valle geográfico del río Cauca, se enfocaron al sector municipal debido a su impacto de contaminación puntual al río Cauca, el 77% de este tipo de contaminación es referido a éste sector (CVC, 2005). A su vez las experiencias fueron categorizadas de acuerdo con la clasificación de reuso expuesta por Lavrador (1987), encontrando que tal solo el 8%, que corresponde a 2 experiencias municipales, realizan un reuso directo planificado, y el 92%, que corresponde a 24 municipios, realizan un reuso indirecto no planificado (Figura 8-1).

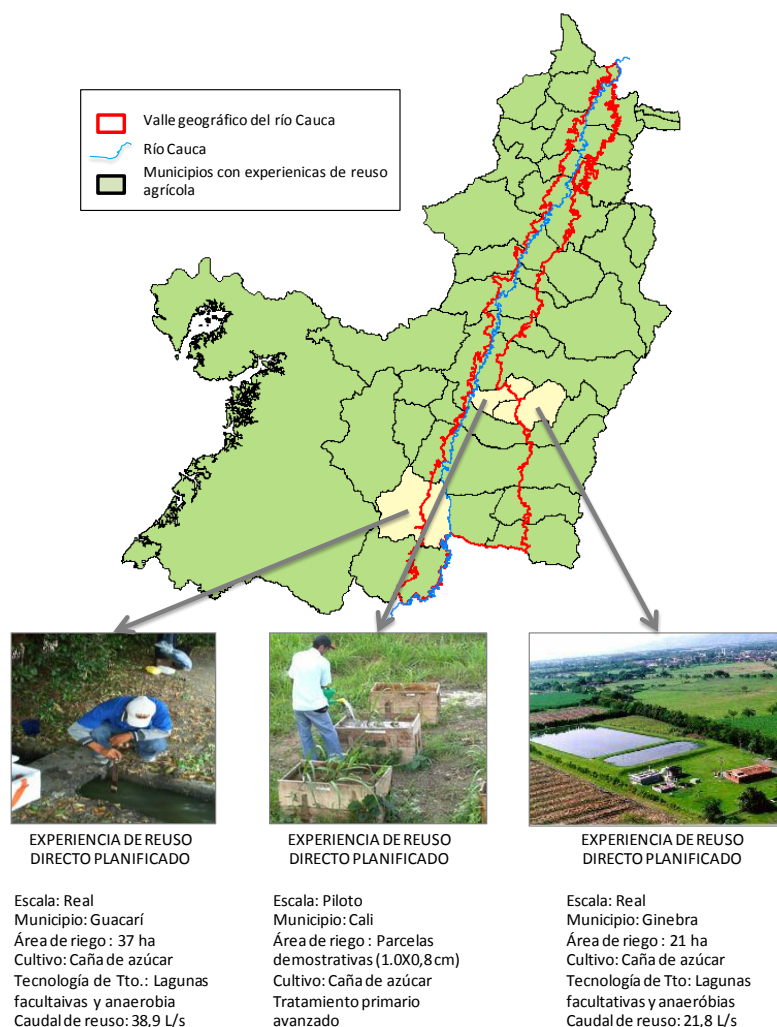


Figura 8-1 Experiencias de reuso directo planeado en el valle geográfico del río Cauca

De los 26 municipios que conforman la zona de estudio, se evidenció que 61% realizan vertimiento sobre estructuras de riego (zanjones o canales) de caña de azúcar sin realizar tratamiento de los efluentes domésticos, de los cuales se han otorgado permisos de aprovechamiento bajo concesionamiento, esto indica que la práctica de reuso de manera indirecta no planificada es avalada en la región. Así mismo el 30% de los municipios realiza vertimiento en fuentes hídricas naturales (ríos) sin tratamiento alguno. Esta es otra forma de reuso indirecto no planificado, dado que agricultores aguas abajo de estas descargas poseen permisos de aprovechamiento, ya sea por concesionamiento o asociados por un proceso de reglamentación de fuentes hídricas. El 7% restante realiza algún tipo de tratamiento Tabla 8-1.

**Tabla 8-1 Identificación de experiencias de reuso indirecto no planificado.**

Evidencia de experiencia de reuso indirecto no planificado	Breve descripción
	<p style="text-align: center;"><b><i>Municipio: Florida</i></b></p> <p>El municipio de Florida descarga sus aguas residuales al zanjón Carisucio que a su vez es una acequia de riego para caña de azúcar. En los procesos de reglamentación de corrientes, es la Derivación 2 del río Fraile</p>
	<p style="text-align: center;"><b><i>Municipio: Buga</i></b></p> <p>El municipio de Buga descarga parte de sus aguas residuales al zanjón Tiacuante que a su vez es una acequia de riego para caña de azúcar.</p>



***Municipio: Palmira***

El municipio de palmira descarga sus aguas residuales a la Derivación 1 del Río Nima, denominada río Palmira.

Dos experiencias de reuso directo planificado fueron evidencias. Las aguas residuales domésticas de los municipios de Ginebra y Guacarí son tratadas y vertidas en zanjones de riego de manera planificada. En el caso del municipio de Ginebra se encuentra la estación de investigación y de trasferencia de tecnolgia en aguas residuales que trata el 100% de los afluentes de la población conformada por 5.033 habitantes (DANE, 2005), mediante la tecnología lagunas de estabilización y laguna anaerobias. Los efluentes tratados benefician al riego de 21.8 ha de caña de azúcar aproximadamente. El municipio de Guacarí trata el 100% del agua residual generada por un población de 21.095 habitantes (DANE, 2005) que a su vez beneficia el riego de 37 ha de caña de azúcar aproximadamente (ACUAVALLE, 2007).

En función de las experiencias de reuso indirecto no planificado y de la calidad del agua para reuso agrícola de productos que poseen algún tipo de proceso industrial, se observó que el 23% de los efluentes con los cuales se realiza el riego presenta condiciones adecuadas de calidad, mediante los lienamientos establecidos por la FAO (1999). En términos de la calidad microbiológica no se encuentran registros de mediciones de agentes patógenos humanos como coliformes fecales y huevos de helminto, esto asociado a que los requerimientos exigidos por la normatividad local no comtemplan este tipo de parámetros.

La base de datos que recopila los parametros necesarios para la caracterización de las experiencias de reuso agrícola en el valle geográfico del río Cauca se presenta en la Tabla 8-2.

**Tabla 8-2 Base de datos para la caracterización de las experiencias de reuso agrícola en la zona de estudio**

ID	DAR	MUNICIPIO 1	MUNICIPIO	POBLACION (HAB)	PTAR X	PTAR Y	REUSO
1	BRUT	BOLIVAR	Bolivar Punto 1	4.180	NO	NO	NO
2	BRUT	EL DOVIO	El Dovio Punto 1	8.564	NO	NO	NO
3	BRUT	LA UNION	La Union Punto 1	25.187	SI	SI	NO
4	BRUT	LA VICTORIA	La Victoria Punto 1	13.516	NO	NO	NO
5	BRUT	LA VICTORIA	La Victoria Punto 2	13.516	NO	NO	NO
6	BRUT	OBANDO	Obando Punto 1	7.334	NO	NO	NO
7	BRUT	ROLDANILLO	Ronaldillo Punto 1	27.795	SI	SI	NO
8	BRUT	TORO	Toro Punto 1	14.165	NO	NO	NO
9	BRUT	ZARZAL	Zarzal Punto 1	29.097	NO	NO	NO
10	CENTROSUR	GINEBRA	Ginebra Punto 1	5.033	SI	SI	SI
11	CENTROSUR	GUACARI	Guacari Punto 1	21.095	SI	SI	SI
12	CENTROSUR	SAN PEDRO	San Pedro Punto 1	5.758	NO	NO	NO
13	CENTROSUR	SONSO	Sonso Punto 1	4.500	NO	NO	NO
14	CENTROSUR	YOTOCO	Yotoco Punto 1	8.711	NO	NO	NO
15	NORTE	ANDALUCIA	Andalucia Punto 1	17.926	NO	NO	NO
16	NORTE	BUGALAGRANDE	Bugalagrande Punto 1	13.695	NO	NO	NO
17	NORTE	BUGALAGRANDE	Bugalagrande Punto 2	13.695	NO	NO	NO
18	NORTE	BUGALAGRANDE	Bugalagrande Punto 3	13.695	NO	NO	NO
19	NORTE	RIOFRIO	Río Frio Punto 1	9.177	SI	SI	NO
20	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 1	41.583	NO	NO	NO
21	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 2	41.583	NO	NO	NO
22	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 3	41.583	NO	NO	NO
23	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 4	41.583	NO	NO	NO
24	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 5	41.583	NO	NO	NO
25	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 6	41.583	NO	NO	NO
26	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 7	41.583	NO	NO	NO
27	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 8	41.583	NO	NO	NO
28	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 9	41.583	NO	NO	NO
29	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 10	41.583	NO	NO	NO
30	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 11	41.583	NO	NO	NO
31	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 12	41.583	NO	NO	NO
32	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 13	41.583	NO	NO	NO
33	NORTE	SEVILLA	Sevilla Punto 14	41.583	NO	NO	NO
34	NORTE	TRUJILLO	Trujillo Punto 1	6.001	NO	NO	NO
35	SUROCCIDENTE	JAMUNDI	Jamundí Punto 1	49.381	NO	NO	NO

ID	DAR	MUNICIPIO 1	MUNICIPIO	POBLACION (HAB)	PTAR X	PTAR Y	REUSO
36	SUROCCIDENTE	JAMUNDI	Jamundí Punto 2	49.381	NO	NO	NO
37	SUROCCIDENTE	JAMUNDI	Jamundí Punto 3	49.381	NO	NO	NO
38	SUROCCIDENTE	VIJES	Vijes Punto 1	5.260	NO	NO	NO
39	SURORIENTE	CANDELARIA	Candelaria Punto 1	24.325	NO	NO	NO
40	SURORIENTE	EL CERRITO	El Cerrito Punto 1	40.143	NO	NO	NO
41	SURORIENTE	EL CERRITO	El Cerrito Punto 2	40.143	NO	NO	NO
42	SURORIENTE	EL CERRITO	El Cerrito Punto 3	40.143	NO	NO	NO
43	SURORIENTE	FLORIDA	Florida Punto 1	40.143	NO	NO	NO
44	SURORIENTE	FLORIDA	Florida Punto 2	40.143	NO	NO	NO
45	SURORIENTE	FLORIDA	Florida Punto 3	40.143	NO	NO	NO
46	SURORIENTE	FLORIDA	Florida Punto 4	40.143	NO	NO	NO
47	SURORIENTE	FLORIDA	Florida Punto 5	40.143	NO	NO	NO
48	SURORIENTE	FLORIDA	Florida Punto 6	40.143	NO	NO	NO
49	SURORIENTE	FLORIDA	Florida Punto 7	40.143	NO	NO	NO
50	SURORIENTE	PRADERA	Pradera Punto 1		NO	NO	NO
51	SURORIENTE	PRADERA	Pradera Punto 2		NO	NO	NO
52	SURORIENTE	SANTAELENA	Santa Elena Punto 1	5.735	NO	NO	NO
53	SURORIENTE	SANTAELENA	Santa Elena Punto 2	5.735	NO	NO	NO
54	NORTE	ALCALA	Alcala Punto 1		NO	NO	NO
55	NORTE	ALCALA	Alcala Punto 2		NO	NO	NO
56	CENTROSUR	BUGA	Buga Punto 1		NO	NO	NO
57	CENTROSUR	BUGA	Buga Punto 2		NO	NO	NO
58	CENTROSUR	BUGA	Buga Punto 3		NO	NO	NO
59	NORTE	CARTAGO	Cartago Punto 1	121.741	NO	NO	NO
60	NORTE	CARTAGO	Cartago Punto 2	121.741	NO	NO	NO
61	NORTE	CARTAGO	Cartago Punto 3	121.741	NO	NO	NO
62	NORTE	CARTAGO	Cartago Punto 4	121.741	NO	NO	NO
63	NORTE	EL AGUILA	El Aguila Punto 1	2.784	NO	NO	NO
64	NORTE	EL AGUILA	El Aguila Punto 2	2.784	NO	NO	NO
65	NORTE	EL AGUILA	El Aguila Punto 3	2.784	NO	NO	NO
71	SURORIENTE	PALMIRA	Palmira	60.000	NO	NO	NO
72	CENTRONORTE	TULUA	Tulua		NO	NO	NO
73	NORTE	ULLOA	Ulloa Punto 1	2.167	NO	NO	NO
74	NORTE	ULLOA	Ulloa Punto 2	2.167	NO	NO	NO
75	NORTE	ULLOA	Ulloa Punto 3	2.167	NO	NO	NO
76	BRUT	VERSALLES	Versalles	7.391	NO	NO	NO

ID	DAR	MUNICIPIO 1	MUNICIPIO	POBLACION (HAB)	PTAR X	PTAR Y	REUSO
77	SUROCCIDENTE	YUMBO	Yumbo Punto 1	78.542	NO	NO	NO
78	SUROCCIDENTE	YUMBO	Yumbo Punto 2		NO	NO	NO
79	SUROCCIDENTE	YUMBO	Yumbo Punto 3		NO	NO	NO
80	SUROCCIDENTE	YUMBO	Yumbo Punto 4		NO	NO	NO
81	SUROCCIDENTE	CALI	Cali Punto 1	2'060.00	SI	SI	Piloto

Nota: La información reportada fue compilada de los Programas de saneamiento y manejo de vertimientos requisito exigido por las autoridades ambientales de la zona de estudio.



## 8.2 Caracterización de la potencialidad del reuso de agua residual doméstica como una estrategia para el control de la contaminación, considerando aspectos técnicos, socioeconómicos y normativos en el valle geográfico del río Cauca.

### 8.2.1 Caso de estudio: Municipio de Cali – Manejo centralizado del agua residual doméstica en la planta de tratamiento de Cañaveralejo (PTAR-C)

#### 8.2.1.1 Descripción de la Solución Convencional para el manejo del agua residual doméstica efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo (PTAR-C)

La planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo presenta eficiencias de remoción adecuadas para un tratamiento primario, pero éstas no son suficientes para cumplir con los niveles exigidos en el Decreto 1594 de 1984 (UNIVALLE, 2008b). En el año 2008, la Universidad del Valle evaluó dos modalidades de tratamiento secundario con lodos activados a escala piloto con el objetivo de lograr el requerimiento exigido por la autoridad ambiental en términos de la eficiencia de remoción. La definición de la solución convencional para el manejo del agua residual doméstica efluente de la PTAR-C se esbozó con base en ésta evaluación, donde se observó que el sistema de lodos activados en modalidad de estabilización por contacto presenta ventajas respecto al sistema de tratamiento de lodos activados convencional (UNIVALLE, 2008b).

En este sentido la solución convencional adoptada para esta investigación, en el caso del manejo del agua residual de la PTAR-C, está conformada por el actual tratamiento primario avanzado, el tratamiento secundario complementario bajo la tecnología de lodos activados en modalidad de estabilización por contacto y la disposición final del efluente del sistema de tratamiento al río Cauca (Figura 8-2).

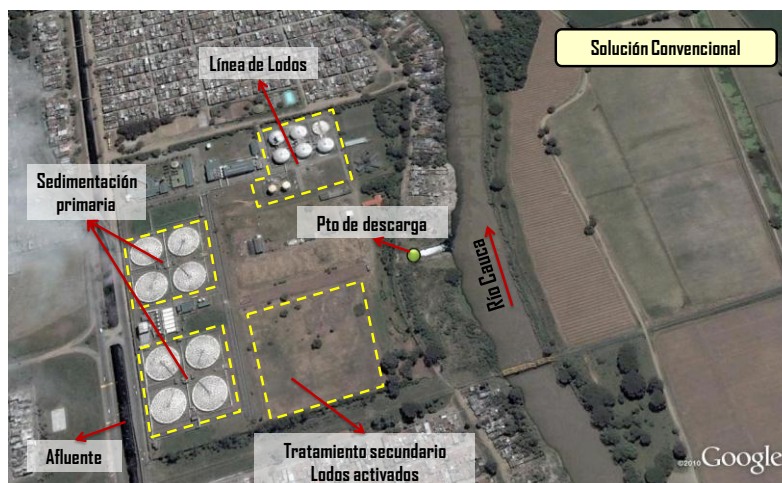


Figura 8-2 Esquema de la solución convencional para el manejo del agua residual efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo

Algunos de los resultados de la investigación realizada por la Universidad del Valle (2010) son los costos de inversión inicial y costos de operación y mantenimiento de la tecnología de lodos activados. La inversión inicial estimada para la estabilización de contacto fue de \$112.600 millones y los elementos principales de este costo se muestran en la Figura 8-2 (Punmia *et al.*, 1998; Universidad del Valle, 2010b). Con base en el modelo de costos de Ralf Otterpohl, *et al.*, (Otterpohl *et al.*, 2008), se estimó un costo de operación y mantenimiento de \$24.000 millones sobre la base de 6 us\$ hab/año y una población de 2060.000 hab

**Tabla 8-3 Costos de inversión inicial del tratamiento secundario complementario de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo**

Actividad	No.	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
Generales	1	61	61
Reactor de contacto	8	989	7.910
Reactor de estanilización	8	1.953	15.621
Secondary settling	8	2.385	19.083
Tanque 1	6	158	950
Tanque 2	2	265	529
Tanque 3	4	244	974
Tanque 4	4	56	226
Estaciones de Bombeo	12	420	5.034
Obra civil hidraulica	1	323	323
Equipos	1	6.964	6.964
Obra civil complementaria	1	4	4
Instalaciones eléctricas	12	645	7.743
Otros	1	47.137	47.137
Total		112.559	

**Fuente: (Universidad del Valle, 2010b)**

#### 8.2.1.2 Descripción de la Solución Alternativa para el manejo del agua residual doméstica efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo (PTAR-C).

- ✓ Caracterización de las opciones de *Solución Alternativa* para el manejo del agua residual doméstica efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo

La *Solución Alternativa* propuesta consiste en un sistema integrado de tratamiento que incluye la implementación de un tratamiento secundario complementario a la PTAR-C y el reuso del efluente de este sistema en el riego de caña de azúcar. Para la definición de ésta *Solución Alternativa* se caracterizaron 4 opciones de tratamiento, que surgieron de la combinación de diferentes unidades de tratamiento de agua residual y la disposición final del efluente teniendo en cuenta el objetivo de reuso agrícola.

Dos de las opciones tecnológicas para el tratamiento secundario complementario a la PTAR-C fueron predimensionadas en el marco de proyectos de investigación realizados por la (Universidad del Valle, 2010), haciendo énfasis en la aplicación de métodos naturales



dada su demostrada eficiencia para el objetivo de tratamiento propuesto (Moscoso *et al.*, 2002) y con base en el marco conceptual de ese proyecto. Las dos opciones propuestas con implementación de métodos naturales, fueron el actual tratamiento primario avanzado de la PTAR-C combinado con la tecnología de Lagunas Facultativas, y el mismo tratamiento primario en combinación con humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial.

En el universo de opciones de tratamiento para reuso agrícola de este caso de estudio, se consideró la implementación de reuso con el efluente de la PTAR-C sin tratamiento secundario complementario, dado que en investigaciones realizadas por la Universidad del Valle se demostró que el efluente de este sistema actual puede ser utilizado según los criterios de Calidad Agrológica establecidos por la FAO en 1987 (Ayers R y Wescot D, 1987), los criterios del USDA (1954) y la EPA (1992). Adicionalmente se consideró la reutilización del efluente de la PTAR-C en combinación con el tratamiento complementario de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto.

De las 4 opciones tecnológicas formuladas, se excluyó la opción de implementar reuso agrícola con el efluente de la PTAR-C (tratamiento primario avanzado) sin tratamiento secundario complementario, dado que bajo las directrices de calidad microbiológica de la Organización Mundial para la Salud (2006) presenta restricción de su uso por los valores altos de Coliformes fecales y huevos de helminto (Silva, 2008). Además no cumple con los requerimientos de eficiencia mínima, del 80% de remoción de carga orgánica, exigidos en la normatividad local (CVC, 1984).

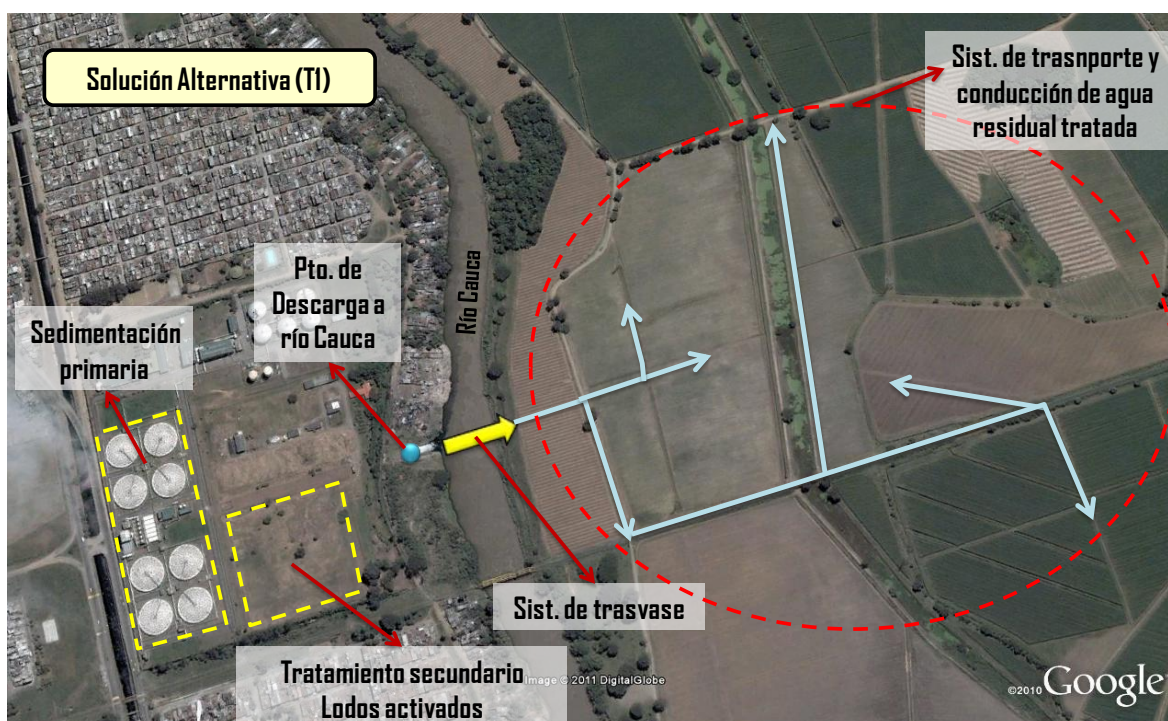
El predimensionamiento de las opciones tecnológicas que consideran métodos naturales se realizó con base en las metodologías propuestas por (Kadlec y Knight, 1996; Madera *et al.*, 2003b; Mara, 1987; Mara, 2003,2006; Mara y Johnson, 2007; Mara *et al.*, 2001; Peña, 2002,2008; Reed *et al.*, 1995). El predimensionamiento de la opción que contempla tecnología de lodos activados se realizó con base en el escalamiento de la planta piloto realizada en investigaciones de la (Universidad del Valle *et al.*, 2008). La Tabla 8-4 presenta el dimensionamiento y los requerimientos de área total de cada una de las opciones tecnológicas de tratamiento secundario complementario a la PTAR-C. Se presenta a continuación la descripción de cada una de las opciones propuestas de tratamiento secundario complementario a la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo.

**Tabla 8-4 Dimensionamiento y requerimiento de área de las tecnológicas de tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**

T	Tecnología (T)	Unidades propuestas	L (m)	An (m)	P (m)	A (ha)
T1	Lodos activados en modalidad de estabilización por contacto	1	-	-	-	3,0
T2	Lagunas facultativas	3	2.153	431,0	1,5	278,1
T3	Humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial	4	1.575	225,0	0,6	141,8

L: Longitud, An: Ancho, P: Profundidad, A: Área

T1. Lodos activados en modalidad de estabilización por contacto: Esta alternativa está conformada por el actual tratamiento primario de la planta de agua residual de Canaveralajo y un tratamiento secundario con implementación de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto (Figura 8-3). Esta alternativa fue propuesta para mejorar la eficiencia de eliminación de la PTAR-C mediante la aplicación de un tratamiento secundario convencional, llegando a la remoción de carga contaminante del 80% según lo estipulado en las normas locales (CVC, 1984). En el año 2008 la Universidad del Valle realizó estudios a escala piloto bajo esta alternativa.



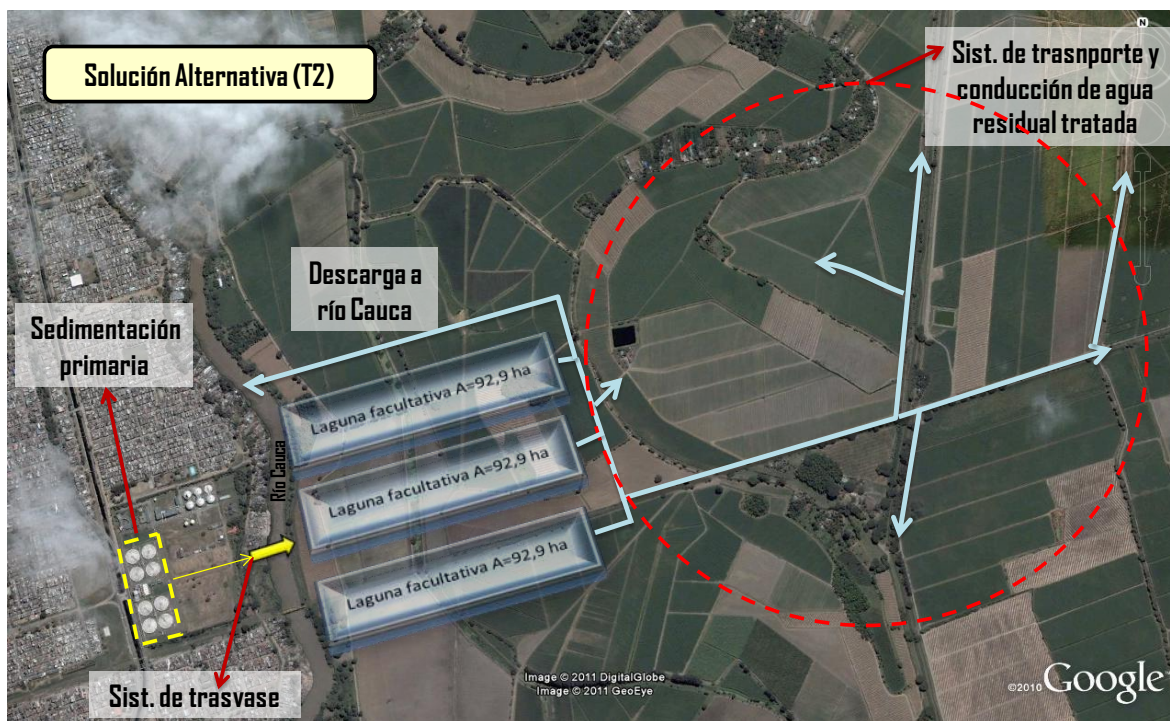
**Figura 8-3 Esquema de la alternativa de reuso de agua residual con lodos activados como tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**  
**Fuente: Adaptado (Universidad del Valle, 2010)**

En cuanto al principio de funcionamiento la tecnología de lodos activados en modalidad de estabilización por contacto busca explotar al máximo la propiedad de bioabsorción que tiene el floc biológico. El proceso consiste en mezclar el agua residual afluyente con lodo activo recirculado en un tanque aireado, llamado reactor de contacto, con TRHneto entre 0,5 y 1 hora. En este lapso los componentes orgánicos son adsorbidos por el floc biológico y no existe realmente actividad metabólica, si no remoción por absorción y adsorción por el lodo. Después del periodo de contacto, el lodo es separado del efluente tratado por sedimentación y el lodo recirculado es aireado en el reactor de estabilización por periodos entre 2 y 6 horas. Durante el periodo de estabilización el material orgánico adsorbido se utiliza para producir nuevas células y energía, renovando las superficies activas del lodo

para posterior adsorción. Como ventaja de este proceso es que permite reducir la capacidad del tanque de aireación convencional en más o menos un 50% (UNIVALLE, 2008b).

En términos de sus eficiencias de remoción, los lodos activados en modalidad de estabilización por contacto presentan eficiencias superiores al 85% de DBO<sub>5</sub> y SST, en cuanto a las eficiencias de remoción de nutrientes entre un 30 a 40% de nitrógeno y entre un 30 a 45% de fósforo (Silva, et al., 2008). En función de reducción de agentes patógenos, con este sistema de tratamiento es posible remover hasta 1 Log de Coliformes Fecales (WHO, 2006). En cuanto a los requerimientos de área se ha estimado un requerimiento de 0,12 a 0,25 m<sup>2</sup>/habitante (Von Sperlling, 2003, citado WHO, 2006).

**T2. Lagunas facultativas (T2):** Esta alternativa está conformada por el actual tratamiento primario de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo y tres lagunas facultativas como tratamiento secundario (Figura 8-4). La metodología de diseño de las lagunas facultativas fue descrita por Mara (2003) considerando como datos iniciales y parámetros de diseño la caracterización del efluente del tratamiento primario PTAR-C (Tabla 8-5).



**Figura 8-4** Esquema de la solución alternativa de reuso de agua residual con lagunas facultativas como tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo

**Fuente:** Adaptado (Universidad del Valle, 2010).



**Tabla 8-5 Datos iniciales y parámetros de diseño para la tecnología de lagunas facultativas como tratamiento secundario complementario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**

Parámetros	Valor
Periodo de diseño	2015
Área de influencia (ha)	9.800
Población de diseño (hab)	206.000
Caudal promedio (m <sup>3</sup> /s)	7,60
Caudal máximo (m <sup>3</sup> /s)	12,24
Carga de DBO (mg/L)	140
Temperatura °C	24

**Fuente:** (Universidad del Valle, 2010).

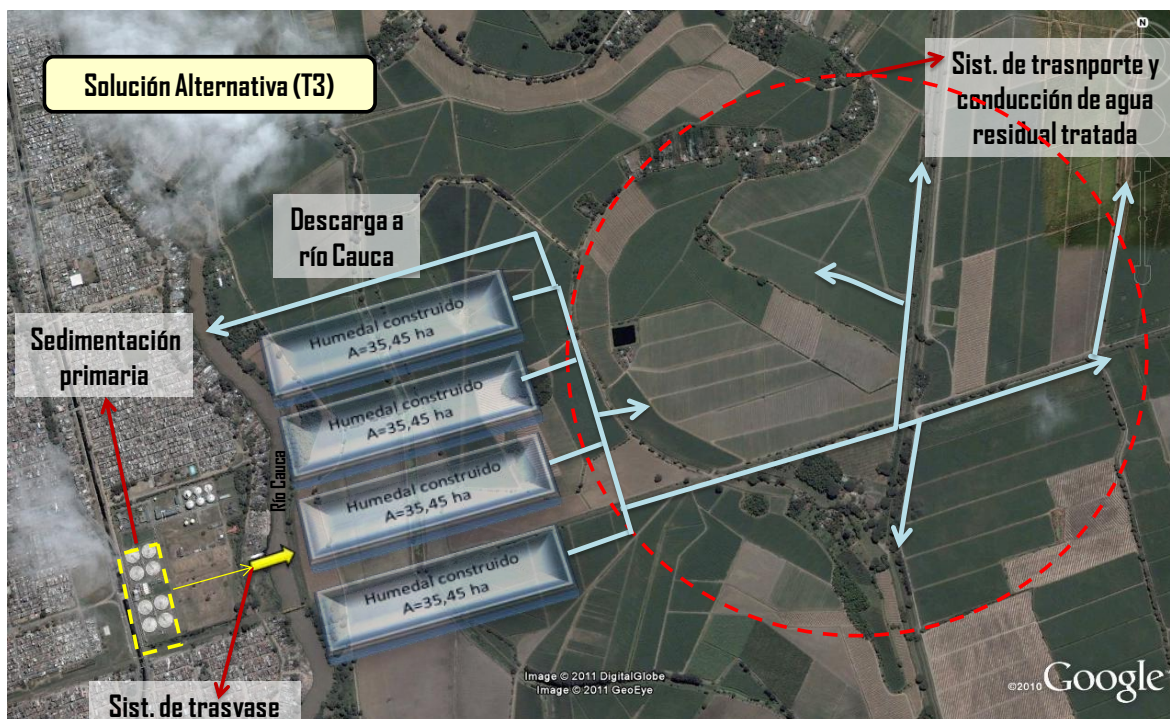
En términos de su principio de funcionamiento y eficiencias de remoción de parámetros de contaminación, las lagunas facultativas se diseñan para remover la DBO bajo condiciones aeróbicas, sin embargo contribuyen también a la remoción de patógenos a través de periodos largos de retención hidráulica que permiten la sedimentación de huevos de helmintos y la mortalidad de bacterias, asociada a los rayos ultravioleta de la energía solar y el aumento del pH por las actividades de las algas (Oakley, 2005).

Las lagunas facultativas presentan eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub> del orden de 60 a 70% en temperaturas de 20 a 25 °C con tiempos de retención hidráulica de 4 a 6 días (Peña y Mara, 2004); la remoción de SS es de 80% y la remoción bental de SSV de 50% (Romero Rojas, 2005). Es posible remover de 2 hasta 2,5 log de coliformes fecales y de 2 a 3,5 log E. Coli en lagunas facultativas con tiempos de retención nominales de 7 a 23 días. Lagunas bien diseñadas hidráulicamente con tiempos de retención hidráulica promedio mínimo de 10 días, se puede obtener una remoción de 2 log de coliformes fecales y E. Coli a temperaturas iguales a 25 °C. La remoción de huevos de helmintos es de 100% por sedimentación (Oakley, 2005).

En cuanto a los requerimientos de área depende del clima, diseño y nivel de tratamiento. La desventaja de las lagunas de estabilización es el área requerida; en climas tropicales y subtropicales, se puede estimar un requerimiento de área para un sistema de lagunas de 2 a 2,5 m<sup>2</sup>/habitante (Oakley, 2005). Mara (2003) propone un área de 0,27 m<sup>2</sup>/habitante para lagunas facultativas. Para temperaturas de 24 °C se estima un área de 0,60 m<sup>2</sup>/habitante (Suarez et al., 2003).

En el manejo de lodos y olores, las lagunas facultativas producen entre 0,4 a 0,6 m<sup>3</sup> de lodo mojado por 1,000 m<sup>3</sup> de aguas residuales tratadas. La ventaja fundamental en el uso de lagunas como tratamiento secundario es la baja producción lodos, comparada con otros procesos (Oakley, 2005). La generación de malos olores es producto de las condiciones anaeróbicas por sobrecarga orgánica (caudal excesivo, descargas industriales, descomposición de lodos acumulados); bloqueo de árboles o estructuras que causan una reducción de transferencia de oxígeno inducida por el viento (MOPT, 1991) citado por (Oakley, 2005); descomposición de natas y material flotante. Por ello es importante el monitoreo diario de olores; la remoción de natas y material flotante (Oakley, 2005).

**T3. Humedal de flujo subsuperficial:** Esta alternativa está compuesta por el actual tratamiento primario de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo y 4 humedales artificiales de flujo subsuperficial como tratamiento secundario (Figura 8-5). El diseño metodológico usado es el proceso propuesto por (Reed et al., 1995). Los datos de diseño se presentan en la Tabla 8-6.



**Figura 8-5 Esquema de la solución alternativa de reuso de agua residual con humedales construidos como tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**  
**Fuente: (Universidad del Valle, 2010).**

**Tabla 8-6 Datos iniciales y parametros de diseño para la tecnología de humedales construidos como tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**

Parámetro	Valor
Caudal Promedio ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	7,600
Eficiencia de remoción de DBO (%)	75
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	24
Medio	Grava
Profundidad de la capa de grava (m)	0,200
Conductividad hidráulica del medio ( $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ )	5.000
Porosidad del medio (%)	40
Pendiente (%)	0,003
Tiempo de retención hidráulica (d)	0,990
Profundidad (m)	1,000
Relación l/b	7

**Fuente: (Universidad del Valle, 2010).**

En términos del principio de funcionamiento y remoción de parámetros contaminantes, los humedales de flujo subsuperficial se construyen típicamente en forma de un lecho o canal

que contiene un medio apropiado y vegetación emergente (EPA, 2000). El medio es comúnmente grava gruesa y arena en espesores de 0,45 a 1 m y pendientes de 0 a 0,5% (Romero, 2004).

Las eficiencias de remoción de  $\text{DBO}_5$  y SST que pueden esperarse en los humedales de flujo subsuperficial son de 60 a 90%. La remoción de nitrógeno está por encima del 75%. La eficiencia de remoción de fósforo depende del tipo de medio o suelo, las eficiencias reportadas fluctúan entre 30 y 50%. Las eficiencias de remoción de bacterias patógenas es mayor a 90% y la remoción de huevos de helmintos varía entre 95 y 100% (Madera *et al.*, 2003a). En cuanto a los lodos y producción de olores, los sistemas de humedales de flujo subsuperficial no producen biosólidos ni lodos residuales, evitando el tratamiento subsiguiente y disposición, siendo esta una ventaja en este tipo de sistemas de tratamiento de aguas residuales (EPA, 2000). Dentro de las principales ventajas de los humedales de flujo subsuperficial es la prevención de mosquitos y olores, debido a que se mantiene el nivel del agua debajo de la superficie del medio (EPA, 2000; Romero, 2004).

#### ✓ Selección de tecnología de tratamiento de agua residual

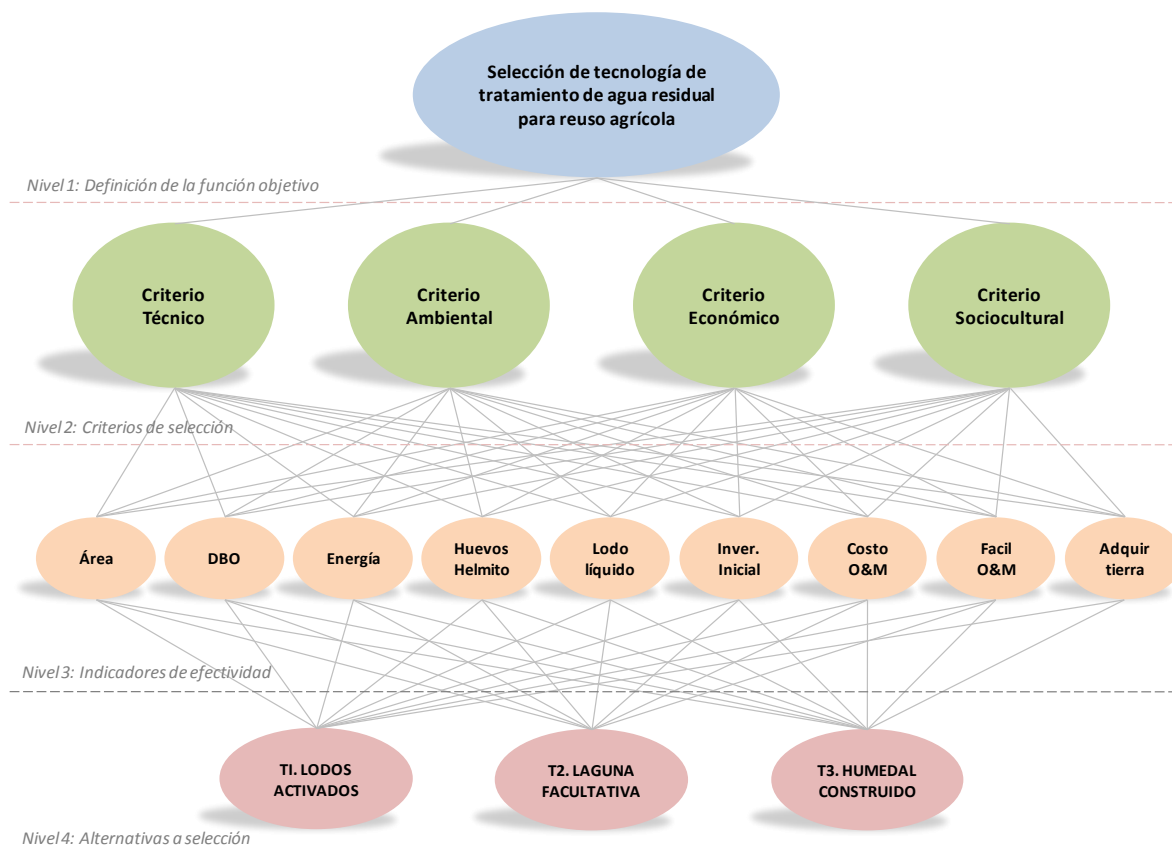
Para la formulación de la *Solución Alternativa* se implementó el Proceso de Análisis Jerárquico y el Análisis Relacional Gris (AHP-GRA, por sus siglas en inglés) descritos por Zeng *et al.*, (2007), para el proceso de selección de tecnología de tratamiento secundario complementario a la PTAR-C, elemento de diferencia entre la *Solución Convencional* y la *Solución Alternativa* propuesta. El primer paso propuesto de esta metodología es la realización del modelo conceptual de selección, donde se definieron: la función objetivo, los criterios identificados para el proceso de selección, los indicadores de efectividad y alternativas a seleccionar (Figura 8-6).

Para el tema específico de definición de criterios de selección de tecnología de tratamiento de agua residual considerando reuso agrícola, los criterios predominantes encontrados en la revisión de literatura, fueron el ambiental, el económico, el técnico y el sociocultural (Abbassi y Baz, 2008; Galvis *et al.*, 2007; Manga *et al.*, 2001; Metcalf y Eddy, 1995; Moscoso y Young, 2002).

Una vez elaborado el modelo conceptual, se definió a través de consulta con expertos, la importancia relativa de los criterios seleccionados y a su vez de los indicadores de efectividad de cada criterio. Los resultados obtenidos de la consulta con expertos, arrojaron una importancia relativa del 43.4% del criterio ambiental, seguido del criterio sociocultural (29.5%), criterio técnico (21.2%) y finalmente el criterio económico (5.9%) (Anexo 4).

La estimación de la importancia relativa entre los indicadores de efectividad se realizó con estadística descriptiva, conforme a los pesos referentes dados por cada experto. Para la estimación de un único peso de referencia se tomó la probabilidad de ocurrencia del 75%, ésta hace referencia a la probabilidad existente entre los expertos consultados para dar un

mismo peso relativo para un indicador específico. La Tabla 8-7, presenta los resultados de este procedimiento.



**Figura 8-6 Modelo conceptual de selección de tecnología de tratamiento secundario de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo**

**Tabla 8-7 Importancia de criterios e indicadores de selección de tecnología de tratamiento de agua residual con fines de reuso agrícola.**

Criterio		Peso	Indicador		Peso	Rank
C1	Técnico	0,21	I1	Requerimiento de área (ha)	0,300	2
			I2	Concentración de DBO en el agua residual (mg/l)	0,400	1
			I3	Requerimiento de energía (kw-h/hab-día)	0,300	3
C2	Ambiental	0,43	I4	Concentración de huevos de helminto (hh/l)	0,570	1
			I5	Producción de lodos (l-hab/año)	0,430	2
C3	Economico	0,06	I6	Costo de inversión inicial (millones euros)	0,436	2
			I7	Costo de O&M (millones euros)	0,564	1
C4	Sociocultural	0,30	I8	Facilidad de O&M (1=fácil, 2=intermedio, 3=complejo)	0,468	2
			I9	Tenencia de la tierra (1= propio, 2=adquisición de terreno)	0,532	1

Como indicador resaltado por diferentes autores para la selección de tecnología de tratamiento de agua residual considerando reuso agrícola, la calidad agrónómica del

efluente es fundamental en el proceso de selección (Ayers R y Wescot D, 1987; Metcalf y Eddy, 2003; Moscoso *et al.*, 2002; Silva, 2008; WHO, 2006). Este indicador establece las directrices de calidad del agua para riego bajo la combinación de diversos parámetros físicoquímicos. Debido a que el actual tratamiento primario de la PTAR-C entrega el efluente sin grado de restricción de uso bajo la calidad agronómica (Silva, 2008), se garantiza con esto que el efluente del sistema de tratamiento complementario en todas las opciones tecnológicas propuestas es óptimo, por tanto este indicador no hace parte del proceso de selección por ser común a todas las opciones propuestas.

Continuando con el proceso de selección se implementó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) donde se caracterizaron las tres opciones de tratamiento en función de los indicadores propuestos (Tabla 8-8). La caracterización de las tecnologías de tratamiento en función de la tenencia de la tierra se determinó en la reunión de presentación de alternativas de tratamiento a la Gerencia de Acueducto y Alcantarillado de EMCALI<sup>2</sup>, donde se manifestaron las limitaciones en adquisición de terrenos para implementar métodos naturales como alternativa para el tratamiento secundario complementario de la PTAR-Cañaveralejo.

**Tabla 8-8 Caracterización de las opciones tecnológicas de tratamiento de conforme a los indicadores de efectividad.**

Criterio	Indicador		Lodos Activados	Laguna	Humedal
			T1	T2	T3
C1	I1	Requerimiento de área (ha)	3,00 <sup>1</sup>	278,10	141,80
	I2	Concentración de dbó en el agua residual (mg/l)	44,00 <sup>2</sup>	23,60	42,00
	I3	Requerimiento de energía (kw-h/hab-día)	22,00 <sup>4</sup>	0,00 <sup>4</sup>	0,00 <sup>4</sup>
C2	I4	Concentración de huevos de helminto (hh/l)	2,51 <sup>3</sup>	0,80	0,69
	I5	Producción de lodos (l-hab/año)	2050,00 <sup>4</sup>	62,50 <sup>4</sup>	0,00 <sup>4</sup>
C3	I6	Costo de inversión inicial (millones euros)	112.559,00	51,92	45,35
	I7	Costo de O&M (millones euros)	9,89 <sup>4</sup>	1,98 <sup>4</sup>	2,47 <sup>4</sup>
C4	I8	Facilidad de O&M (1=fácil, 2=intermedio, 3=complejo)	3,00	2,00	1,00
	I9	Tenencia de la tierra (1= propio, 2=adquisición de terreno)	1,00	2,00	2,00

**Fuentes:** <sup>1</sup>Universidad del Valle y Emcali (2008). <sup>2</sup>Vazquez (2009). <sup>3</sup>Jiménez (2009). <sup>4</sup>World Health Organization (2006).

Una vez caracterizadas las opciones tecnológicas, se realizó la técnica de normalización de datos, que ayuda a prevenir los errores lógicos asociados a manipulación y permite realizar comparaciones en términos de la unidad (Romero, 1997). Para la normalización fue importante establecer si los valores obedecen a una función de máximos o de mínimos, lo cual permitió dar mayor importancia respecto al valor menor o mayor según fuera el caso, así la concentración de huevos de helminto en el efluente del sistema de tratamiento, se espera sea una función de mínimos.

<sup>2</sup> Reunión realizada en el marco del proyecto SWITCH, ente de financiación de la investigación



Posterior a esto se implementó el Análisis Relacional Gris (GRA) estimando el primer coeficiente relacional gris que relaciona el esquema de referencia, es decir las opciones tecnológicas a seleccionar, y esquema optativo de indicadores (Tabla 8-9).

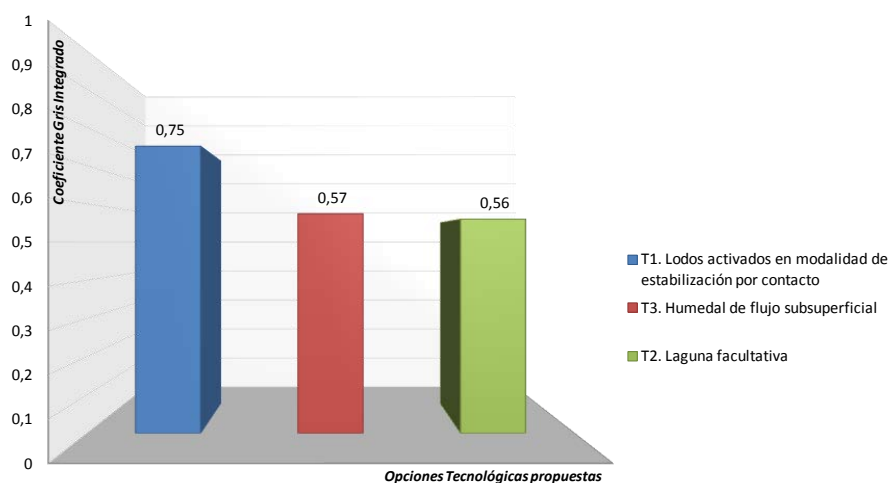
**Tabla 8-9 Normalización de datos crudos y estimación de primer coeficiente relacional gris**

Criterio	Indicador	Normalizacion			Primer coeficiente relacional gris		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3
Técnico	I1	1,00	0,01	0,02	1,00	0,34	0,34
	I2	0,54	1,00	0,56	0,52	1,00	0,53
	I3	0,00	1,00	1,00	0,33	1,00	1,00
Ambiental	I4	0,27	0,86	1,00	0,41	0,78	1,00
	I5	0,00	0,00	1,00	0,33	0,33	1,00
Económico	I6	0,00	0,87	1,00	0,33	0,80	1,00
	I7	0,20	1,00	0,80	0,38	1,00	0,71
Sociocultural	I8	0,33	1,00	0,50	0,43	1,00	0,50
	I9	1,00	0,50	0,33	1,00	0,50	0,43

La estimación del segundo coeficiente gris permitió relacionar el esquema de referencia (opciones tecnológicas) y el esquema optativo de criterios, para su estimación fue necesario normalizar el primer coeficiente relacional gris, tal como se realizó con los datos crudos y ponderar el resultado por el peso relativo de cada criterio (Tabla 8-10).

**Tabla 8-10 Estimación del segundo coeficiente relacional gris**

Criterio	1er. Coeficiente relacional gris ponderado			Normalización 1er Coeficiente gris ponderado			2do Coeficiente relacional gris		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
C1	0,608	0,801	0,615	1,000	0,759	0,988	1,000	0,554	0,963
C2	0,376	0,590	1,000	1,000	0,637	0,376	1,000	0,452	0,325
C3	0,362	0,912	0,839	1,000	0,397	0,432	1,000	0,332	0,346
C4	0,732	0,734	0,462	0,631	0,629	1,000	0,448	0,447	1,000

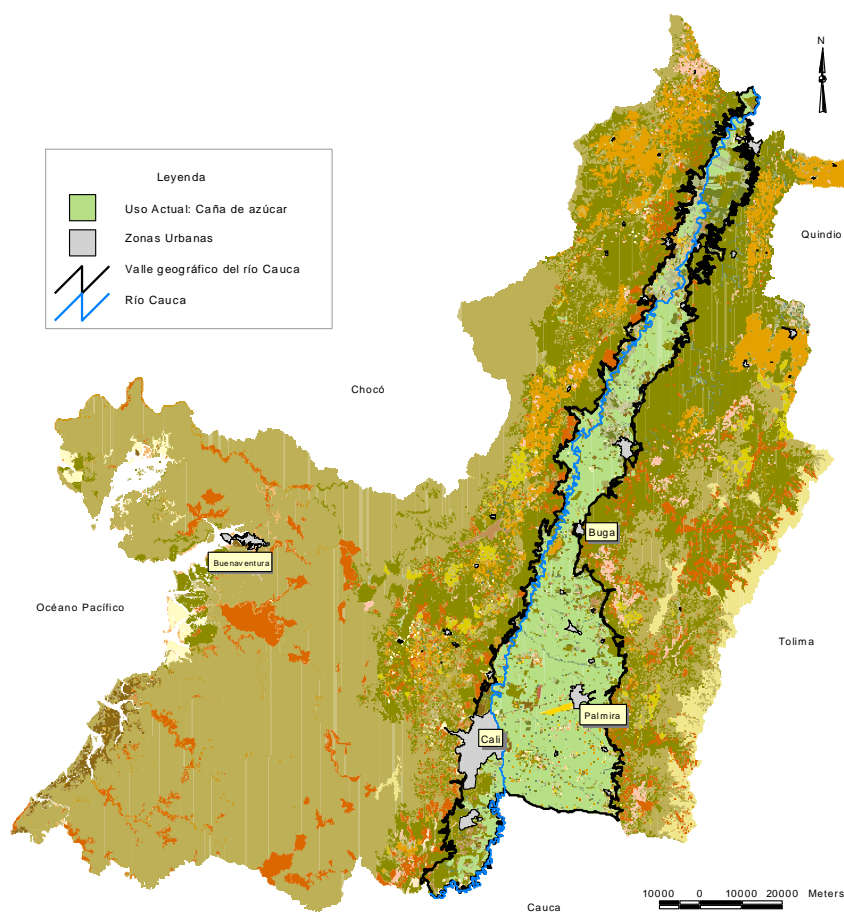


**Figura 8-7 Jerarquización de las opciones de tratamiento secundario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo con base en el segundo coeficiente relacional gris integrado**

Se obtuvo el vector relacional gris integrado, que relaciona el esquema de referencia y la ponderación de las alternativas con base en el peso relativo de cada criterio. Este último paso permitió seleccionar la opción de tratamiento secundario complementario a la PTAR-C, que es la tecnología complementaria de lodos activados en modalidad de estabilización por contacto (Figura 8-7).

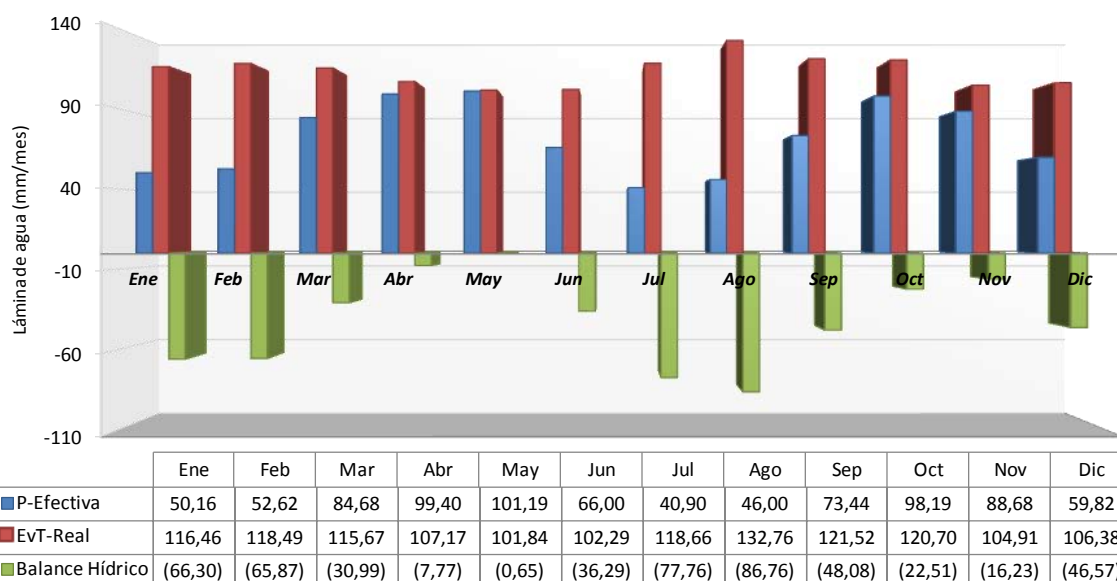
✓ Definición del plan agrícola para la implementación de reuso de agua residual tratada

La definición del plan agrícola para la implementación de reuso con agua residual de la PTAR-C, se realizó teniendo en cuenta solo dos aspectos, primero, la definición del área potencial de riego y segundo, el requerimiento hídrico del cultivo. Solo se tuvieron en cuenta estas actividades, dado que en el contexto local evaluado se evidencia práctica de monocultivo de caña de azúcar en un 58,14%, que corresponde a 186.441 ha de la zona plana de la cuenca alta del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca (CVC, 2010) (Figura 8-8). Esto sugiere que el plan agrícola se encuentra ampliamente desarrollado por el sector y en términos de evaluación de reuso agrícola es suficiente la definición de solo las actividades citadas.



**Figura 8-8 Usos del suelo en la zona de estudio.**  
**Fuente:** Elaboración propia con base en (CVC 2006) (CVC y FAL, 1998)

La selección del área potencial para riego surge en primera instancia de las necesidades de agua de los cultivos. Bajo ésta condición se realizó el estimativo de estas necesidades mediante el balance hídrico simplificado (Sokolov y Chapman, 1981), donde se logró determinar la temporalidad y la cantidad requerida de agua para riego (Figura 8-9). Como aplicación particular de esta metodología, se estableció la realización del balance en términos del diferencial entre la precipitación efectiva (Pe) y la evapotranspiración real del cultivo de caña (EVt). La determinación de Pe se realizó mediante la metodología USDA (2004), y la EVt mediante método combinado de la FAO (1977) y el tanque evaporimétrico (CENICAÑA, 2002).



**Figura 8-9 Estimación de demanda de agua mediante metodología de balance hídrico simplificado en el área de influencia de riego con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo.**

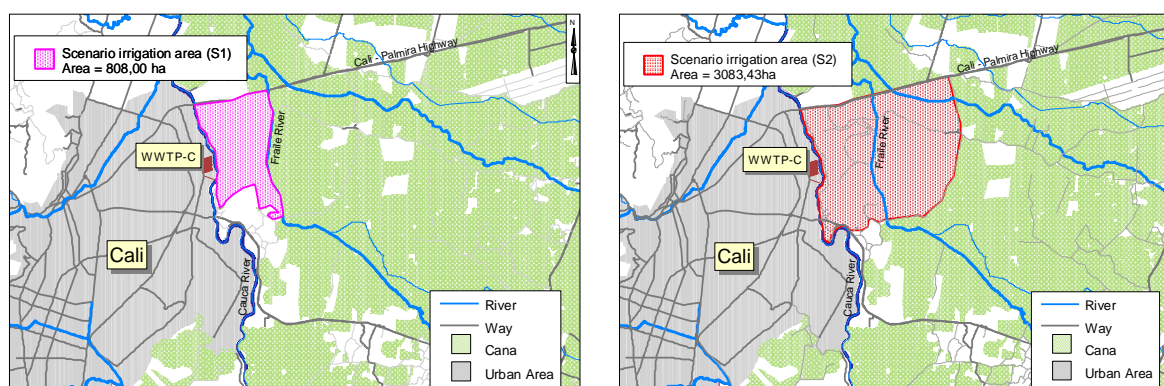
Los datos climatológicos necesarios para la estimación del balance hídrico simplificado, se tomaron de la estación de referencia Guachalzambolo, que pertenece a la red de estaciones del Centro de Investigación para la Caña de Azúcar-CENICAÑA, ubicada en la cuenca del río Guachal a margen derecha del río Cauca, por ser representativa del área a disponer el agua residual de la PTAR-C, con un periodo de registro de 17 años (1993-actual) y con una escala de agregación mensual multianual. De los resultados del balance hídrico en la zona de estudio, se observa que el reuso de agua residual tratada presenta potencialidad los 365 días del año, donde existe déficit o balance hídrico negativo (Figura 8-9).

Según los estimativos realizados, el 100% de la oferta de agua residual, 7,6 m<sup>3</sup>/s, proyectada para el año 2015 (año en el cual la PTAR-C alcanza su caudal de diseño) suple el requerimiento hídrico de 7.038 ha de caña en el mes crítico de agosto. Pese a esta gran potencialidad de reuso agrícola en función del área de riego, se consideraron criterios adicionales para la estimación del área potencial efectiva (Tabla 8-11).

**Tabla 8-11 Criterios empleados para la estimación del área de riego con agua residual tratada de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**

Criterio		Indicador de selección
1	Uso actual del suelo	<u>Indicador:</u> Cultivos que se consumen y se procesan comercialmente. Dadas las condiciones de la zona de estudio se seleccionaron áreas con cultivo de caña de azúcar.
2	Proximidad a la PTAR-C del punto de entrega para riego	<u>Indicador:</u> Predios limítrofes con el punto de entrega propuesto de la PTAR-C. Se seleccionaron los predios que se encuentran en la franja de 2,5 km paralela a río Cauca. Conforme a los estudios realizados por la CVC (2004), se identificó que estos predios consumen agua del río Cauca.
3	Pendiente a favor del punto de entrega de agua residual para riego	<u>Indicador:</u> Nivel topográfico inferior al puntos de entrega propuesto de la PTAR-C. Se seleccionaron puntos de entrega de agua a favor de la pendiente del terreno, garantizando así el sistema se riego preferente en la zona de estudio para este cultivo (riego por surcos-Gravedad).
4	Limites físicos para entrega de agua para riego	<u>Indicador:</u> Limitantes físicos para la conducción de agua. Vías principales como la recta Cali Palmira y ríos. Ver Figura 8-10.
5	Vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero	<u>Indicador:</u> Baja vulnerabilidad del sistema acuífero. Se seleccionaron áreas donde el grado del vulnerabilidad a la contaminación se considera baja, según estudios realizados por la CVC mediante la metodología de (Foster <i>et al.</i> , 2003). La cuenca alta del río Cauca en el deparatamento del Valle del Cauca, presenta una excelente reserva de agua subterránea en términos de calidad de agua y estimada en 10.000 Mm <sup>3</sup> , de donde el 12% de la recarga promedio anual (3500 Mm <sup>3</sup> ) de este sistema es empleado para riego de caña de azúcar (CVC, 2010)

Bajo estos criterios, se realizó el proceso de definición de área potencial de riego como producto de intercepciones cartográficas con apoyo del software ArcGIS versión 9.0. El área de riego potencial estimada fue de 3.080 ha (ver Escenario 2 de la Figura 8-10 ), con lo es posible reutilizar el 43% (3,32 m<sup>3</sup>/s) del caudal de agua residual generada por el municipio de Cali en el periodo mas seco, correspondiente al mes de agosto.



**Figura 8-10 Escenarios de potencial de reuso de agua residual con estimación de diferentes valores de área para riego en el mes crítico (Agosto).**

✓ Estimación de costos de la *Solución Alternativa*

Los costos identificados para la *Solución Alternativa* fueron discriminados en costos de inversión inicial y costos de operación y mantenimiento. Los elementos que conforman la *Solución Alternativa* son: el tratamiento secundario de la planta de agua residual de Cañaveralejo con tecnología de lodos activados en modalidad de estabilización por contacto, un sistema de trasvase de agua residual tratada, un sistema de conducción y distribución de agua para riego y un sistema de bombeo (ver *Solución Alternativa* T1 (Figura 8-3). La estimación de estos costos se realizó con base en los precios del mercado a 2010 considerados en el contexto local.

C1. Costo del sistema de tratamiento secundario complementario de la planta de tratamiento de Cañaveralejo: Los costos del sistema de tratamiento secundario fueron estimados anteriormente en la descripción de la *Solución Convencional* de este caso de estudio. El costo de inversión inicial estimado de este sistema de tratamiento fue de \$112.000 millones y el costo de operación y mantenimiento se estimó en \$24.000 millones.

C2. Costo del sistema de trasvase de agua residual tratada: Debido a que el área potencial de reuso agrícola se encuentra localizada a margen derecha del río Cauca (ver escenarios de área potencial Figura 8-10), se propone en la solución alternativa dimensionar la estructura de trasvase del agua residual tratada, para poder ser utilizada en riego de caña de azúcar. Los estimativos de costos se realizaron con base en los prediseños elaborados por la (UNIVALLE, 2008b). para el trasvase piloto con caudal del  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Por tanto, como costo estimado del sistema del trasvase de agua residual propuesto en este proyecto, la inversión inicial estimada para transportar  $3,32 \text{ m}^3/\text{s}$  fue de \$4.658 millones y la operación y mantenimiento de \$ 232 millones de pesos aproximadamente.

C3. Costos del sistema de conducción y distribución de agua residual tratada para riego: Para la estimación de los costos del sistema de conducción y distribución del agua residual tratada en la PTAR-C con fines de reuso agrícola, fue necesario determinar el requerimiento hídrico del cultivo (caña de azúcar) y con esto se realizó el predimensionamiento del sistema. Con base en la información climatológica de la zona de estudio, el modulo de riego encontrado fue de  $1,08 \text{ L/s-ha}$ . Considerando el escenario de área de riego propuesto ( $3080,43 \text{ ha}$ ) se estableció que el caudal de diseño del sistema de riego es de  $3,32 \text{ m}^3/\text{s}$ , estimativos realizados para el mes de agosto mes por ser el mes crítico deficitario.

Con este caudal de diseño, se realizó el trazado de la red de conducción y distribución considerando la topografía de la zona, los límites físicos del sistema (ríos y vías) y las demandas requeridas de los usuarios existentes (cultivadores de caña). Una vez trazada la red se realizaron escenarios de dimensionamiento de tuberías con el apoyo de la herramienta EPANET versión 2. El detalle de dimensionamiento del sistema se presenta en el Anexo 5. Así los costos estimados de inversión inicial del sistema de conducción y distribución del agua residual tratada para riego agrícola fueron de \$3.561 millones. De acuerdo con la firma (COLPOZOS 2010a) el modelo de costos de operación y

mantenimiento para los sistemas de riego en el Valle del Cauca establece un costo del 5% de la inversión inicial del sistema, es decir \$ 178 millones aproximadamente.

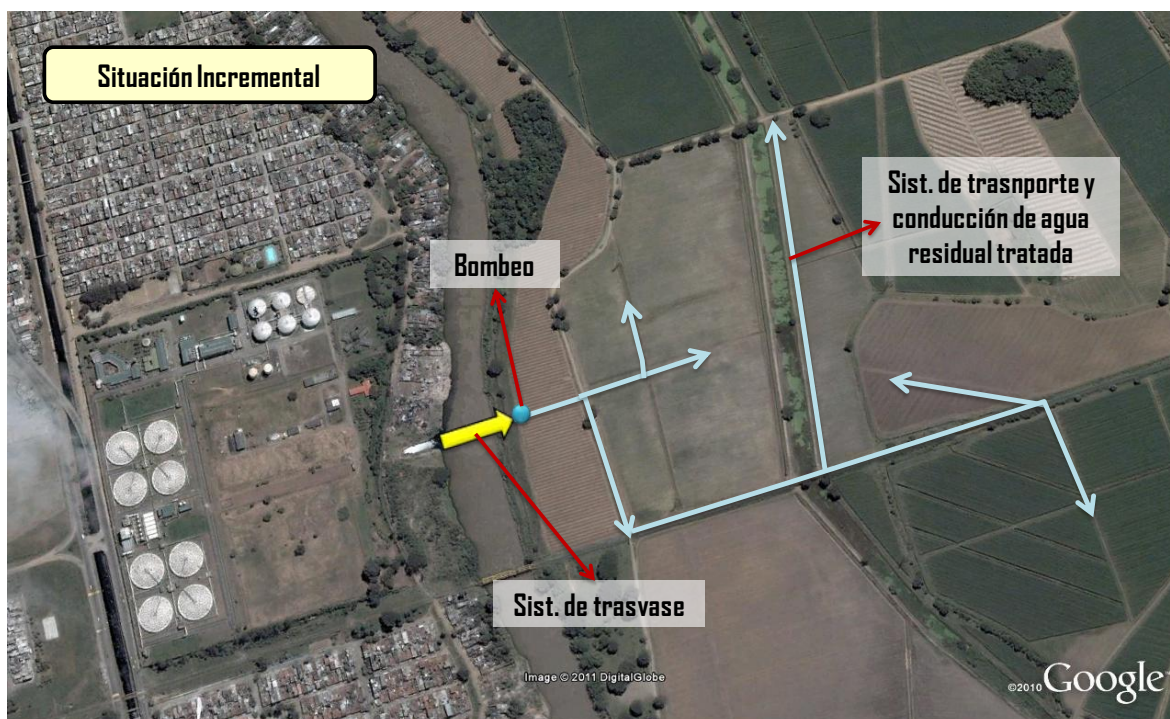
C4. Costos del sistema de bombeo: Una vez estimado el caudal de diseño y la carga dinámica total, se determinó que la potencia requerida del sistema es de 1.600 HP (Anexo 5). El costo de inversión inicial de la estación de bombeo que cumple con los requerimientos del sistema es de \$1.775 millones (COLPOZOS 2010a). Los costos de operación se estimaron con base en el requerimiento energético considerando que el costo de un 1 Kw-h es de \$300. Así el costo de operación y del sistema con base en la potencia y con tiempo de operación de 24 horas por 25 días/mes fue de \$4.631 millones anual. Los costos asociados al mantenimiento del sistema se determinaron bajo el modelo de costos implementado por COLPOZOS, como un 5% del costo de operación, es decir \$ 231 millones.

#### 8.2.1.3 *Potencialidad del reuso agrícola con el efluente de planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo*

La potencialidad del reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo se realizó conforme a la metodología de evaluación socioeconómica de (Miranda, 2000), quien evalúa los impactos de una solución en un periodo de tiempo determinado bajo dos indicadores de viabilidad. A la solución implementada se conoce como *Situación Incremental*, dado que no considera los elementos comunes entre la *Solución Convencional* y la *Solución Alternativa*. Para éste caso de estudio la *Situación Incremental* evaluada se presenta en la Figura 8-11, la cual incluye 3 elementos principales: un sistema de trasvase de agua residual tratada, un sistema de bombeo y un sistema de conducción y distribución del agua residual para riego.

Los costos, los beneficios y los indicadores de viabilidad fueron evaluados a 30 años, periodo en el cual se consideran aspectos como vida útil y tiempo de reposición. La Tabla 8-12 cita los costos y beneficios identificados para cada solución y para la *Situación Incremental* sobre la cual se realizó la evaluación socioeconómica, presenta además cada actor relacionado con la implementación del reuso agrícola.





**Figura 8-11 Elementos a considerar en la estimación de costos utilizando el efluente de la PTAR-C en reuso agrícola**

**Tabla 8-12 Costos y beneficios identificados en la implementación del reuso agrícola.**

Costos		Solución Convencional	Solución Alternativa	Situación Incremental	Actor
C1	Inversión inicial del tratamiento secundario complementario a la planta de tratamiento de Cañaveralejo.	SI	SI	NO	No aplica
C2	Inversión Inicial del sistema de trasvase de agua residual tratada.	NO	SI	SI	Empresa prestadora de servicios públicos y municipio.
C3	Inversión Inicial sistema de transporte y distribución de agua.	NO	SI	SI	Sector agrícola
C4	Inversión inicial estación de bombeo de agua residual tratada.	NO	SI	SI	Sector Agrícola
C5	Costos de O&M del tratamiento secundario complementario a la planta de tratamiento de Cañaveralejo.	SI	SI	NO	No aplica
C6	Costos de O&M del sistema de trasvase de agua residual tratada.	NO	SI	SI	Empresa prestadora de servicios públicos y municipio.
C7	Costos de O&M del sistema de transporte y distribución de agua para riego.	NO	SI	SI	Sector Agrícola
C8	Costos de O&M de la estación de bombeo de agua residual tratada.	NO	SI	SI	Sector Agrícola

**Continuación Tabla 8-10**

Beneficios		Solución Convencional	Solución Alternativa	Situación Incremental	
B1	Ahorro por menor uso de fertilizantes	NO	SI	SI	Sector Agrícola
B2	Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental	NO	SI	SI	Empresa prestadora de servicios públicos y municipio.
B3	Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental	NO	SI	SI	Sector agrícola
B4	Ahorro en infraestructura para riego. Pozos profundos de agua subterránea	NO	SI	SI	Sector Agrícola
B5	Aumento de la calidad del cuerpo Hídrico Receptor	NO	SI	Sin estimación financiera	Sociedad en general

En cuanto al beneficio relacionado con el aumento de la calidad en el cuerpo hídrico receptor del agua residual (B5), dada la inexistencia de estudios que relacionen el aumento del OD y la disminución de la DBO con un beneficio económico, como con el aumento de biota en el cuerpo hídrico, no fue posible cuantificar un beneficio en términos financieros. Sin embargo, este beneficio, fue evidenciado mediante la modelación de la calidad del río y conforme a la metodología de evaluación socioeconómica implementada presenta como un beneficio cualitativo, el cual será presentado en el numeral posterior.

✓ Estimación de costos en la *Situación Incremental*

Los costos estimados para la implementación de reuso agrícola fueron discriminados en costos de inversión inicial y costos de operación y mantenimiento considerando los precios de mercado del año 2010. Con base en la Tabla 8-12, los costos asociados a inversión inicial (C1) y operación y manetimiento del tratamiento secundario complementario a la PTAR-C (C5), no fueron incluidos en el análisis de viabilidad en la situación incremental, dado que estos son comunes a ambas soluciones. En este sentido, los costos estimados para la implementación del reuso agrícola se presentan en la Tabla 8-13, descritos en la caracterización de la *Solución Alternativa*.

**Tabla 8-13 Resumen de costos de implementación reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo**

C	Elemento	Costos (millones de pesos)
C2	Inversión inicial del sistema de trasvase de agua residual tratada	4.658
C3	Inversión inicial del sistema de conducción y distribución de agua	3.561
C4	Inversión inicial de la estación de bombeo de agua residual tratada	1.775
C6	Costos de O&M del sistema de trasvase de agua residual tratada	232
C7	Costos de O&M del sistema de conducción y distribución de agua para riego	178
C8	Costos de O&M de la estación de bombeo de agua residual tratada	4.862



✓ Estimación de beneficios en la *Situación Incremental*

**B1. Ahorro por menor uso de fertilizantes:** Considerando que el área de riego con el efluente de la PTAR-C es de 3080,43 ha, las necesidades de fertilizantes estimadas fueron de 21.560 bultos de UREA/año y 12.320 bultos de NPK/año. Estas necesidades se estimaron con base a la necesidad por hectárea reportada por el (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009). Para la estimación de este beneficio se debe contemplar el aporte de carga nutricional de que puede ofrecer el agua efluente de la PTAR-C en función su concentración de nitrógeno y fósforo. Para este caso específico, se corroboró que el agua residual aporta el 100% de las necesidades nutricionales de la caña de azúcar. La cuantificación económica de este beneficio se realizó considerando el costo por bulto de fertilizante (NPK= \$61.650; y UREA= \$67.350) multiplicado por el área de riego potencial (Tabla 8-14).

**Tabla 8-14 Estimación del beneficio “Ahorro por menor uso de fertilizantes” al implementar el reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**

Item/Año	1	5	7	10	15	20	25	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	-	-	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417
Ahorro (Millones de \$)	-	-	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417

**B2. Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental:** Para calcular este beneficio se emplearon precios de 2010 sobre la base de la estructura instrumento económico de la Tasa Retributiva (TR), que es una estimación del flujo de descarga en el río, las concentraciones de DBO y SST y el tiempo de descarga. Este instrumento se rige por el Decreto 3100 (MAVDT, 2003) que considera un costo asociado a la contaminación puntual de 106,5 \$/kg DBO<sub>5</sub> y 45,5 \$/kg SST. La estimación de beneficio se muestra en la Tabla 8-15 para cada cinco años.

**Tabla 8-15 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**

Item/Año	1	5	7	10	15	20	25	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	-	-	423	423	423	423	423	423
Ahorro (Millones de \$)	-	-	423	423	423	423	423	423

**B3 Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental:** La estimación de este beneficio se realizó con precios de 2010, basada en la estructura del instrumento económico Tasa por Uso del Agua (TUA), la cual depende del volumen extraído para riego y del costo establecido por m<sup>3</sup> de agua subterránea, que corresponde a 1,26 \$/m<sup>3</sup> (CVC 2009). La Tabla 8-16 presenta la estimación realizada para las soluciones consideradas.

**Tabla 8-16 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**

Item/Año	1	5	7	10	15	20	25	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	-	-	65,44	65,44	65,44	65,44	65,44	65,44
Ahorro (Millones de \$)	-	-	65,44	65,44	65,44	65,44	65,44	65,44

**B4 Ahorro en infraestructura para riego. Pozos profundos de agua subterránea:** Con base en los resultados obtenidos, el caudal de riego estimado para la zona fue de 3,32 m<sup>3</sup>/s. De acuerdo con las características hidrogeológicas de la zona para la extracción de este caudal es necesaria la construcción de 41 pozos con profundidad de 150 m, con un caudal de bombeo de 80 L/s y un costo unitario de \$300 millones (COLPOZOS 2010a). El valor total de la inversión en la construcción de los 42 pozos es de \$12.300 millones.

De acuerdo con los requerimientos de operación y mantenimiento suministrados por la empresa COLPOZOS S.A., los estimativos de operación para un pozo profundo con las características de diseño descritas anteriormente, obedecen al consumo energético. Teniendo en cuenta que la potencia requerida para los pozos descritos es de 75HP/pozo con un tiempo de operación de 18 h y un costo de 300 \$/Kw-h. Se estimo así, un costo de operación \$162 millones / pozo-año, para un beneficio de \$6.680 millones. Adicional a esto, de acuerdo con el modelo de costos de mantenimiento utilizado por la (COLPOZOS 2010a), el 5% del costo de operación es asumido como un costo de mantenimiento. Por tanto el beneficio asociado al manetnimiento anual fue de \$334 millones (Tabla 8-17).

**Tabla 8-17 Estimación del beneficio “Ahorro en infraestructura para riego” al implementar el reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**

Item/Año	1	5	7	10	15	20	25	27	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	-	-	12.300	7.014	7.014	7.014	7.014	19.314	14.028
Ahorro (Millones de \$)	-	-	12.300	7.014	7.014	7.014	7.014	19.314	14.028

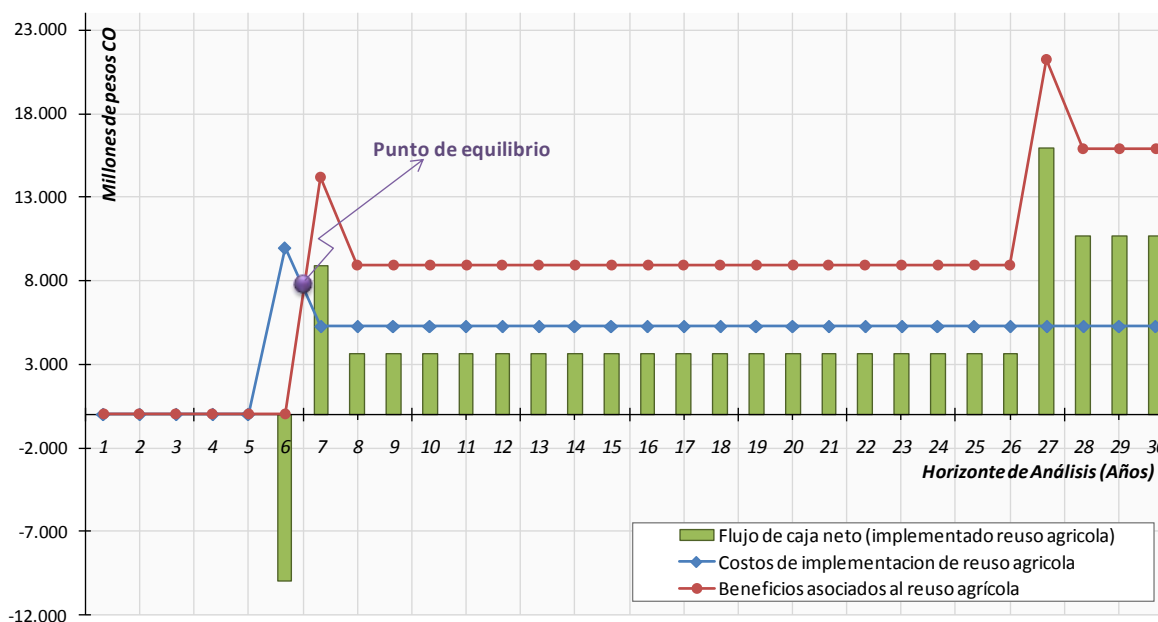
Asociado al beneficio de ahorro en infraestructura para riego se aprecia que en el año 27 del periodo de análisis los beneficios se incrementan significativamente y esto obedece al considerar los costos evitados en reposición de pozos profundos y operación y mantenimiento de los mismos, debido a que la vida útil de ésta infraestructura es de 20 años (COLPOZOS 2010a).

#### ✓ Estimacion de indicadores de viabilidad

Una vez estimados los costos y beneficios de implementar el reuso agrícola como una estrategia para el control de la contaminación, se estimaron dos criterios de viabilidad, el primero de ellos eficiencia económica el cual hace referencia a la diferencia entre los beneficios y costos en un mismo lapso de tiempo; el segundo se conoce como la relación beneficio/costo (Brent 2006). El periodo de análisis considerado fue de 30 años, periodo en

el cual se tienen en cuenta los tiempos de vida útil y tiempos de reposición de los diferentes componentes presentados en la *Situación Incremental*. Con objeto de presentación, en la Tabla 8-18 se muestra el análisis temporal de flujo de costos y beneficios en el periodo de análisis, fraccionado en dos subperiodos. Dado el nivel de la investigación se resalta que los costos y beneficios estimados se consideran preliminares y se deberán adelantar prediseños y estimativos mas detallados en cuanto se profundice en la línea de investigación.

El principal objetivo del criterio de eficiencia económica es maximizar la diferencia entre beneficios y costos. Esta diferencia es el efecto del beneficio de implementar el reuso agrícola como una estrategia de control de la contaminación. Este indicador en la *Solución Alternativa* fue positivo con un valor de \$15.244 millones, que significa que los costos estimados son más bajos que los beneficios. Para analizar este indicador en escala temporal se realizó la Figura 8-12, donde se observa que los costos de implementación de la *Solución Alternativa* formulada son máximos en el año 6, debido a la inversión inicial de la construcción de los sistemas de tratamiento secundario, trasvase y conducción y distribución de agua para riego. Apartir del año 7 de implementación los costos presentan un comportamiento constante hasta el año último del horizonte de análisis, esto debido a que los costos referenciados corresponden a los costos de operación y mantenimiento de los elementos considerados en la *Solución Alternativa*.



**Figura 8-12 Análisis temporal de costos y beneficios en la *Situación Incremental*.**

En cuanto al comportamiento de los beneficios de implementar el reuso agrícola se observan dos picos correspondientes en los años 7 y 27. Esto obedece a los costos evitados en infraestructura de captación de agua subterránea para la realización de las actividades de riego. Los beneficios relacionados en el año 27 son la combinación del ahorro en fertilizantes, ahorro en tasas ambientales y los costos evitados de reposición de pozos

**Tabla 8-18 Costos, beneficios y flujo de caja neto de la implementación de reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo como estrategia para el control de la contaminación hídrica.**

Periodo de análisis (Año 1 a 15)															
Costos/Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C2	-	-	-	-	-	4.659	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	3.562	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C4	-	-	-	-	-	1.755	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C6	-	-	-	-	-	-	233	233	233	233	233	233	233	233	233
C7	-	-	-	-	-	-	178	178	178	178	178	178	178	178	178
C8	-	-	-	-	-	-	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863
<b>Total costos</b>	-	-	-	-	-	9.976	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274
Beneficio/Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
B1	-	-	-	-	-	-	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417
B2	-	-	-	-	-	-	423	423	423	423	423	423	423	423	423
B3	-	-	-	-	-	-	65	65	65	65	65	65	65	65	65
B4	-	-	-	-	-	-	12.300	7.014	7.014	7.014	7.014	7.014	7.014	7.014	7.014
<b>Total Beneficios</b>	-	-	-	-	-	-	14.205	8.920	8.920	8.920	8.920	8.920	8.920	8.920	8.920
<b>Flujo de caja</b>	-	-	-	-	-	- 9.976	8.932	3.646	3.646	3.646	3.646	3.646	3.646	3.646	3.646

Periodo de análisis (Año 16 a 30)															
Costos/Año	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
C2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C6	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233
C7	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178
C8	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863	4.863
<b>Total costos</b>	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274	5.274
Beneficio/Año	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
B1	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417
B2	423	423	423	423	423	423	423	423	423	423	423	423	423	423	423
B3	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
B4	7.014	7.014	7.014	7.014	7.014	7.014	7.014	7.014	7.014	7.014	7.014	19.314	14.028	14.028	14.028
<b>Total Beneficios</b>	8.920	8.920	8.920	8.920	8.920	8.920	8.920	8.920	8.920	8.920	8.920	21.220	15.934	15.934	15.934
<b>Flujo de caja</b>	3.646	3.646	3.646	3.646	3.646	3.646	3.646	3.646	3.646	3.646	3.646	15.946	10.660	10.660	10.660

profundos, los cuales presentan una vida útil de 20 años, maximizando así el beneficio obtenido por la implementación del reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo. Desde el año 8 hasta el año 26 se presenta un comportamiento constante en los beneficios debido a que los sistemas diseñados (sistema de trasvase y riego) fueron concebidos para operar a máxima capacidad desde el año 1 de operación de los mismos.

El flujo de caja permite visualizar la diferencia entre los beneficios y costos en la unidad temporal. En el flujo de caja es cero en los primeros cinco años del proyecto, sobre la base actual del plan de inversiones presentada por la empresa prestadora de servicios públicos, la cual estima realizar la construcción del sistema de tratamiento secundario en el año 2017 ó año 6 de referencia en esta investigación. Posteriormente el flujo de caja se hace negativo en el año 6 dadas las inversiones a realizarse para la inversión descrita. A partir del año 7 el flujo de caja es positivo dado que los beneficios de la implementación de reuso agrícola superan los costos incurridos año a año, comportamiento que se presenta desde el año 7 hasta el año 30 del periodo de análisis. Este comportamiento es el esperado, ya que al inicio del año 7 la línea de los costos y beneficios se intercepta, a lo cual se le conoce como punto de equilibrio (Figura 8-12).

En cuanto al indicador relación beneficio-costos, este presentó un valor de superior a la unidad (Tabla 8-19), que en términos socioeconómicos permitió identificar la viabilidad y rentabilidad de la implementación de la práctica de reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo. Sin embargo, para completar la evaluación será necesario realizar un perfeccionamiento de los precios de mercado con los cuales se realizaron todas las estimaciones de costos.

**Tabla 8-19 Indicadores de viabilidad socioeconómica de la implementación de reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**

Indicadores de viabilidad socioeconómica	Valor
VPN de los costos incrementales (millones de pesos)	28.871
VPN de los beneficios (millones de pesos)	44.115
Flujo de caja $VPN_{Beneficios} - VPN_{Costos}$ (millones de pesos)	15.244
Relacion Costo / beneficio (adimensional)	1,53

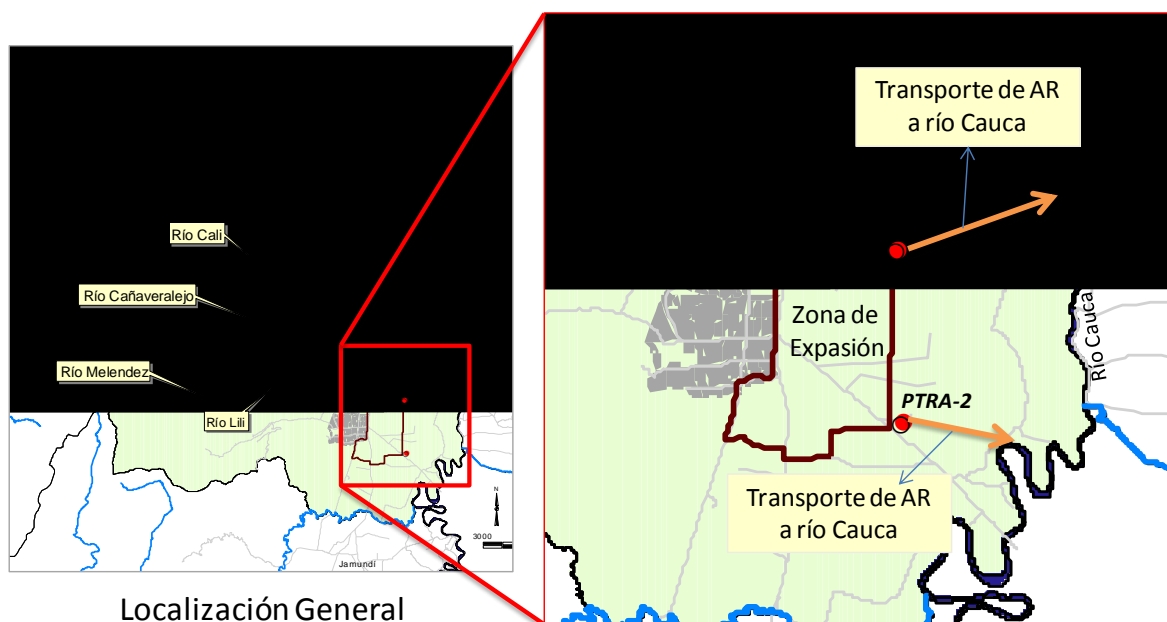
## 8.2.2 Caso de estudio: Zona de expansión del Municipio de Cali – Manejo descentralizado del agua residual doméstica

### 8.2.2.1 Descripción de la Solución Convencional para el manejo del agua residual doméstica en la zona de expansión del municipio de Cali

La conceptualización de la solución convencional para la zona de expansión del municipio de Cali se fundamentó en la descentralización del tratamiento del agua residual doméstica aprovechando la topografía del sector y dado cumplimiento con lo dispuesto en la normatividad local acerca de las disposiciones de vertimiento a cuerpos hídricos receptores (Norma), cumpliendo así con las eficiencias de remoción del 80% en carga de DBO y SST (Figura 8-13). Para ello se propuso la construcción de un tren de tratamiento compuesto por una laguna anaerobia de alta tasa y una laguna facultativa con baffles. El dimensionamiento de este sistema se realizó con base en las metodologías propuestas por Mara y Johnson (2007) y considerando la caracterización del agua residual de una localidad con condiciones socioeconómicas similares a los futuros habitantes de la zona (Tabla 8-20).

**Tabla 8-20 Dimensionamiento del sistema de tratamiento en la Solución Convencional para la zona de expansión del municipio de Cali.**

Unidad de Tratamiento	Área (ha)	TRH (h)	Longitud (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)
Laguna anaerobia de alta tasa	1,57	1,17	249,51	136,17	4,00
Laguna facultativa secundaria con baffles	9,78	4,00	345,00	283,35	1,50



**Figura 8-13 Esquematación de la solución convencional en el manejo de agua residual doméstica en la zona de expansión de Cali**

Cuatro alternativas adicionales fueron formuladas para el manejo del agua residual de la zona de expansión de Cali, la primera de ellas realizada por (EMCALI *et al.*, 2006a), propone la centralización del tratamiento, realizando bombeo del agua residual hacia la planta de tratamiento de Cañaveralajo. Las tres alternativas restantes proponen un manejo descentralizado implementando alguna un sistema de lodos activados convencional,

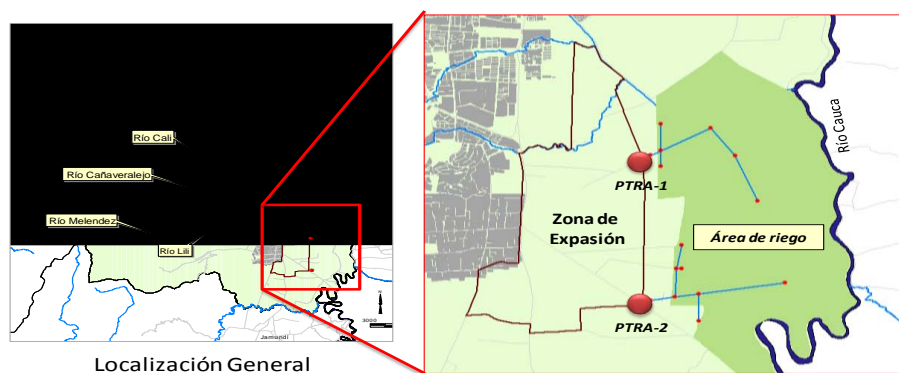
Los costos de inversión inicial para este sistema fueron estimados a partir de ítems o actividades gruesas y de gran relevancia dentro de los costos tales como: costo de terreno, geomembrana, geotextil, grava, etc (Anexo 6). El valor asumido para cada uno de estos ítems es el establecido por la gobernación del departamento del Valle del Cauca a través de Decreto No. 0532 de 03 de mayo de 2010. Los costos de operación y mantenimiento fueron calculados bajo el modelo de costos de Von Sperling (2004) publicados por (WHO 2006).

De acuerdo con la metodología de evaluación que se empleó en esta investigación, los costos estimados de la Solución Convencional se sintetizaron a los costos del sistema de tratamiento dado que los demás elementos, como la redes de conducción de agua residual tratada al río Cauca, son comunes a la Solución Alternativa que se presentará posteriormente. En este sentido la Solución Convencional tiene una inversión inicial de \$6.545 millones y costos de operación y mantenimiento de estimados \$327 millones.

#### 8.2.2.2 Descripción de la Solución Alternativa para el manejo del agua residual doméstica en la zona de expansión del municipio de Cali

- ✓ Caracterización de las opciones de *Solución Alternativa* para el manejo del agua residual doméstica en la zona de expansión del municipio de Cali

La *Solución Alternativa* propuesta en este caso de estudio consiste en un sistema integrado de tratamiento que incluye la implementación de un sistema de tratamiento de agua residual doméstica de manera descentralizada y el reuso del efluente de este sistema en el riego de caña de azúcar (Ver Figura 8-14).



**Figura 8-14 Esquema de la Solución Alternativa propuesta para el manejo de agua residual doméstica en la zona de expansión del municipio de Cali**

Las opciones tecnológicas para el sistema de tratamiento de agua residual doméstica fueron prediseñadas en el marco del proyecto de investigación SWITCH, desarrollado por la Universidad del Valle (2009) y fueron prediseñadas considerando como objetivo de tratamiento el reuso agrícola con énfasis en la aplicación de métodos naturales dada su demostrada eficiencia para el objetivo de tratamiento propuesto (Moscoso *et al.*, 2002), y fundamentadas en las experiencias existentes en el contexto de la región (cuenca alta del río Cauca), como las lagunas facultativas en los municipios de Guacarí, La Unión, Roldanillo y Toto, con eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub> entre un 80 y 85% (Corrales y Montenegro, 2000) y las experiencias en el sector rural de la comunidad de la Vorágine, conformada por un tanque séptico con filtros anaeróbios y humedales subsuperficiales de flujo horizontal que emplean como especie vegetativa *Scirpus, sp*; los resultados muestran un excelente remoción de materia orgánica (Madera et al., 2003).

Inicialmente fueron propuestas 18 opciones de tratamiento de agua residual de la zona de expansión de Cali, que surgieron de la combinación de diferentes unidades de tratamiento de métodos naturales y la disposición final del efluente (Tabla 8-21).

**Tabla 8-21 Opciones tecnológicas de tratamiento formuladas en la Solución Alternativa para el manejo del agua residual en la zona de expansión en el municipio de Cali**

ID	Tecnología de tratamiento (t)	Disposición o uso del efluente
1	Primary Facultative Pond+ Rock Filter	Cauca river
2	Primary Facultative Pond+ Maturation Pond	Irrigation
3	Primary Facultative Pond (3/4Q) + Fishing Pond (Q/4)	3/4 Q Cauca river Q/4 Effluent Fishing Pond for Irrigation
4	Primary Facultative Pond with baffles+ Rock Filter	Irrigation
5	Primary Facultative Pond with baffles (3/4Q) + Fishing Pond (Q/4)	3/4 Irrigation Q/4 Effluent Fishing Pond for Irrigation
6	Anaerobic pond+ Secondary facultative pond+ Rock Filter	Cauca river
7	Anaerobic pond+ Secondary facultative pond+ Maturation pond	Irrigation
8	Anaerobic pond+ Secondary facultative pond+(Q/4) Fishing pond	3/4 Q Cauca river Q/4 Effluent Fishing Pond for Irrigation
9	Anaerobic pond+ Secondary facultative pond with baffles+ Rock Filter	Irrigation
10	Anaerobic pond+ Secondary facultative pond with baffles+(Q/4) Fishing pond	3/4 Irrigation Q/4 Effluent Fishing Pond for Irrigation
11	High rate Anaerobic Pond+ Secondary facultative pond with baffles+ Rock Filter	Irrigation
12	High rate Anaerobic Pond+ Secondary facultative pond with baffles+(Q/4) Fishing pond	3/4 Irrigation Q/4 Effluent Fishing Pond for Irrigation
13	Anaerobic pond+Sub surface Constructed Wetland	Cauca river
14	Anaerobic pond+Sub surface Constructed Wetland+ Maturation pond	Irrigation
15	Anaerobic pond+Sub surface Constructed Wetland+ (3/4Q) Fishing pond	3/4 Q Cauca river Q/4 Effluent Fishing Pond for Irrigation
16	High rate Anaerobic Pond+Sub surface Constructed Wetland	Cauca river
17	High rate Anaerobic pond+Sub surface Constructed Wetland+ Maturation pond	Irrigation
18	High rate Anaerobic pond+Sub surface Constructed Wetland+ (3/4Q) Fishing pond	3/4 Q Cauca river Q/4 Effluent Fishing Pond for Irrigation

**Fuente: (Universidad del Valle y CINARA, 2009).**

Para la definición del universo de opciones de tratamiento de agua residual se evaluó el apoyo institucional de la empresa prestadora del servicio de acueducto y alcantarillado de la zona de estudio respecto a la operación y mantenimiento de cada una de las tecnologías propuestas. Esta evaluación se realizó en la reunión de presentación de alternativas de



tratamiento a la Gerencia de Acueducto y Alcantarillado de EMCALI<sup>3</sup>. De los resultados obtenidos se excluyeron seis opciones tecnológicas que consideran la implementación de acuicultura dado el alto nivel de complejidad en operación y mantenimiento y a la aceptación social de los subproductos de ésta práctica (Universidad del Valle y CINARA, 2009).

De las tecnologías formuladas en la Tabla 8-21, se excluyeron además, aquellas que tienen como alternativa de disposición final el río Cauca, considerando que éstas opciones solo se diseñaron con el objetivo tratamiento en función de la normatividad local (Acuerdo CVC No. 14 de 1976), que establece como indicador de cumplimiento el 80% de eficiencia de remoción de carga orgánica (DBO<sub>5</sub> y SST). Adicional a esto la caracterización fisicoquímica del efluente de estas cuatro tecnologías, no alcanzó los estándares de calidad agronómica propuestos por la FAO en 1987 (Ayers R y Wescot D, 1987) y este en sentido, el universo de opciones tecnológicas a caracterizar en función del reuso agrícola (riego de caña de azúcar) fueron seis (Tabla 8-22). Su dimensionamiento se realizó con base en las metodologías propuestas por (Kadlec y Knight, 1996; Madera *et al.*, 2003; Mara, 1987; Mara, 2003,2006; Mara y Johnson, 2007; Mara *et al.*, 2001; Peña, 2002,2008; Reed *et al.*, 1995).

**Tabla 8-22 Dimensionamiento de las opciones de tratamiento de agua residual para la zona de expansión.**

T	Tecnología	Área (ha)	TRH (h)	Longitud (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Área Total (ha)
T1	Laguna facultativa primaria	22,33	12,28	500,00	446,51	2,00	32,99
	Laguna de maduración	10,67	3,00	350,00	304,84	1,00	
T2	Laguna anaerobia	1,23	1,00	120,00	102,48	3,00	21,85
	Laguna facultativa secundaria	9,78	4,00	345,00	283,35	1,50	
	Laguna de maduración	10,85	3,00	360,00	301,36	1,00	
T3	Laguna anaerobia	1,23	1,00	120,00	102,48	3,00	17,08
	Laguna facultativa secundaria con baffles	9,78	4,00	345,00	283,35	1,50	
	Filtro de roca	6,07	0,40	270,00	224,84	0,60	
T4	Laguna anaerobia de alta tasa	1,57	1,17	249,51	136,17	4,00	17,42
	Laguna facultativa secundaria con baffles	9,78	4,00	345,00	283,35	1,50	
	Filtro de Roca	6,07	0,40	270,00	224,84	0,60	
T5	Laguna anaerobia	1,23	1,00	120,00	102,48	3,00	27,83
	Humedal construido de flujo subsuperficial	15,83	1,03	430,00	368,21	0,60	
	Laguna de maduración	10,76	3,00	360,00	298,95	1,00	
T6	Laguna anaerobia de alta tasa	1,57	1,17	249,51	136,17	4,00	28,17
	Humedal construido de flujo subsuperficial	15,83	1,03	430,00	368,21	0,60	
	Laguna de maduración	10,76	3,00	360,00	298,95	1,00	

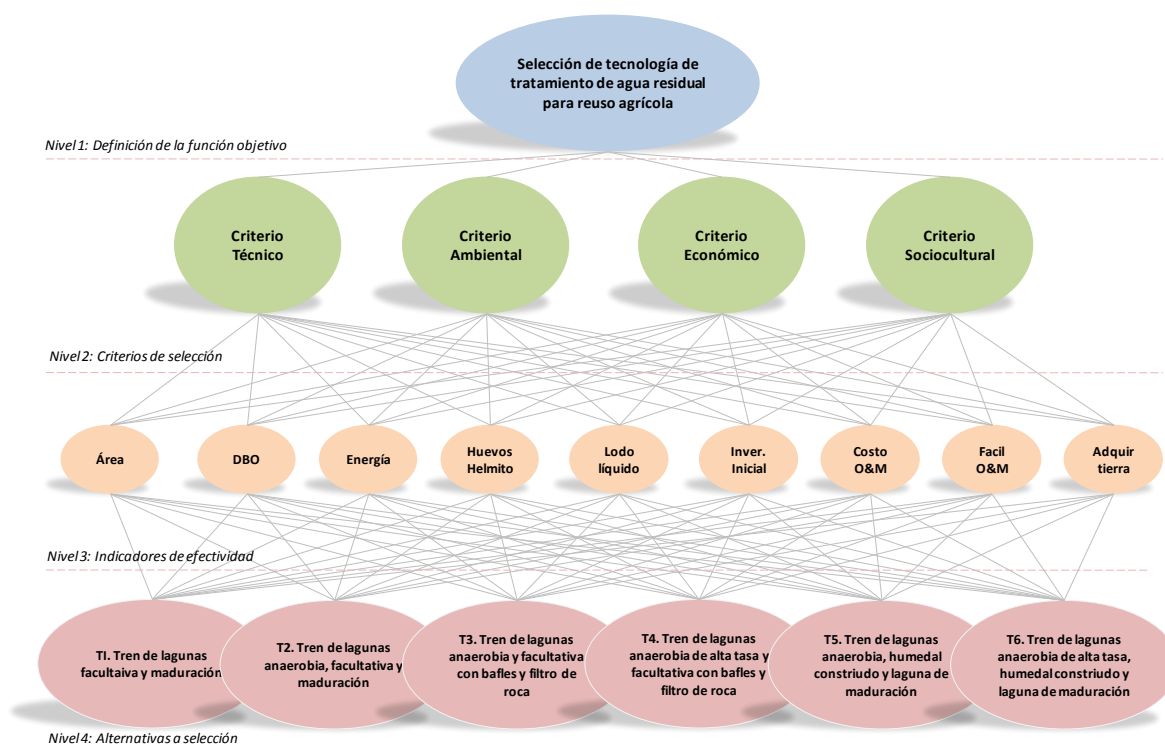
**Fuente: (Universidad del Valle y CINARA, 2009)**

#### ✓ Selección de tecnología de tratamiento de agua residual

Para el tema específico de definición de criterios de selección de tecnología de tratamiento de agua residual considerando reuso agrícola, los criterios predominantes encontrados en la

<sup>3</sup> Reunión realizada en el marco del proyecto SWITCH, ente de financiación de la investigación

revisión de literatura, han sido el ambiental, el económico, el técnico y el sociocultural (Abbassi y Baz, 2008; Galvis *et al.*, 2007; Manga *et al.*, 2001; Metcalf y Eddy, 1995; Moscoso y Young, 2002). Para la formulación de la Solución Alternativa se implementaron el proceso de análisis jerárquico y el análisis relacional gris al igual que en el caso de estudio de manejo del agua residual de la planta de tratamiento de Cañaveralejo, este análisis fue descrito por Zeng *et al.*, (2007), y permitió seleccionar la tecnología de tratamiento de agua residual para la zona de expansión. El primer paso realizado fue la esquematización del modelo conceptual donde se definió: la función objetivo, los criterios identificados para el proceso de selección, los indicadores de efectividad y alternativas a seleccionar (Figura 8-15).



**Figura 8-15** Modelo conceptual de selección de tecnología de tratamiento con implementación de métodos naturales y objetivo de reuso agrícola

Para la formulación de criterios e indicadores de efectividad, se emplearon los resultados de la consulta con expertos desarrollada en el caso de Cali, donde se aprovechó la matriz de Saaty (Romero, 1997; Zeng *et al.*, 2007) para comparar el nivel de importancia de un criterio respecto al otro. Los resultados obtenidos de ésta consulta, arrojaron una importancia relativa del 43.4% del criterio ambiental, seguido del criterio sociocultural (29.5%), criterio técnico (21.2%) y finalmente el criterio económico (5.9%) (Anexo 4). La estimación de la importancia relativa entre de los indicadores de efectividad se realizó conforme a los pesos referentes dados por cada experto. Para la estimación de un único peso de referencia se tomó la probabilidad de ocurrencia del 75%, esta hace referencia a la

probabilidad existente entre los expertos consultados para dar un mismo peso relativo para un indicador específico. La Tabla 8-23, presenta los resultados de este procedimiento.

Para el caso de estudio del manejo del agua residual doméstica en el zona de expansión de Cali, en función de los indicadores de selección de tecnología de tratamiento de agua residual, se consideró el indicador de calidad fisicoquímica propuesto por la FAO (1999), el cual relaciona la concentración de DBO, SST, E.Coli y pH que debe contener el agua para ser implementada en reuso agrícola de productos que se consumen y se procesan comercialmente. Estos parámetros se obtuvieron de las caracterizaciones realizadas a un efluente de referencia, para dar cumplimiento a los requerimientos establecidos por la normatividad local (Acuerdo CVC No. 14 de 1976). Es importante recordar que la zona de expansión de Cali es una zona proyectada y la caracterización del agua residual para esta zona fue tomada de un referente con condiciones socioculturales similares al área proyectada (Efluente de la planta de tratamiento Aguas del Sur).

**Tabla 8-23 Importancia de criterios e indicadores de selección de tecnología de tratamiento de agua residual con fines de reuso agrícola.**

Criterio		Peso	Indicador		Peso	Rank
C1	Técnico	0,21	I1	Requerimiento de área (ha)	0,300	2
			I2	Concentración de DBO en el agua residual (mg/l)	0,400	1
			I3	Requerimiento de energía (kw-h/hab-día)	0,300	3
C2	Ambiental	0,43	I4	Concentración de huevos de helminto (hh/l)	0,570	1
			I5	Producción de lodos (l-hab/año)	0,430	2
C3	Economico	0,06	I6	Costo de inversión inicial (millones euros)	0,436	2
			I7	Costo de O&M (millones euros)	0,564	1
C4	Sociocultural	0,30	I8	Facilidad de O&M (1=fácil, 2=intermedio, 3=complejo)	0,468	2
			I9	Tenencia de la tierra (1= propio, 2=adquisición de terreno)	0,532	1

Bajo este panorama y considerando la eficiencia de remoción de la tecnologías propuestas, la calidad fisicoquímica del efluente no fue considerada como un indicador de selección, dado que todas las tecnologías cumplen con el requerimiento de calidad de agua para reuso agrícola según los lineamientos de la FAO (1999). Sin embargo la concentración de DBO se consideró como indicador de selección y las tecnologías fueron caracterizadas con base en las eficiencias de remoción de este parámetro reportadas en la literatura (Kadlec y Knight, 1996; Madera *et al.*, 2003; Mara, 1987; Mara, 2003,2006; Mara y Johnson, 2007; Mara *et al.*, 2001; Peña, 2002,2008; Reed *et al.*, 1995) (Galvis *et al.*, 2007);(Silva *et al.*, 2008).

Continuando con el proceso de selección, se aplicó el proceso de análisis jerárquico (AHP), donde se caracterizaron las seis opciones de tratamiento de agua residual en función de los indicadores propuestos (Tabla 8-24). La caracterización de las tecnologías de tratamiento en función de la tenencia de la tierra se determinó en el marco de las alianzas de aprendizaje, en la reunión de presentación de alternativas de tratamiento a la Gerencia de Acueducto y Alcantarillado de EMCALI, donde se manifestó la posibilidad de adquisición de terrenos dado el requerimiento de área de cada una de las opciones tecnológicas.

**Tabla 8-24 Caracterización de las opciones tecnológicas de tratamiento de agua residual conforme a los indicadores de efectividad**

Criterio		Indicador	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Técnico	I1	Requerimiento de área (ha)	32,99	21,85	17,08	17,42	27,83	15,70
	I2	Concentración de DBO en el agua residual (mg/L)	31,70	37,40	16,30	17,20	9,40	9,40
	I3	Requerimiento de energía (kW-h/hab-día) <sup>1</sup>	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,30
Ambiental	I4	Concentración de huevos de helminto en el agua residual (hh/L)	0,04	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
	I5	Producción de lodos (L-hab/año) <sup>1</sup>	62,50	107,50	107,50	107,50	45,00	45,00
Económico	I6	Costo de inversión inicial (millones de pesos)	18.963,00	11.518,00	11.798,00	12.033,00	20.413,00	20.648,00
	I7	Costo de O&M <sup>1</sup> (Miles de pesos)	948,15	575,90	589,90	601,65	1.020,65	1.032,40
Sociocultural	I8	Facilidad de O&M (1=Fácil, 2=Intermedio, 3=Complejo)	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	I9	Tenencia de la tierra (1= Propio, 2=Adquisición de terreno)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

Fuentes: <sup>1</sup> World Health Organization (2006). Los datos que no poseen superíndice se obtuvieron con base en el predimensionamiento de las alternativas en el marco del Proyecto SWITCH (2010).

Una vez caracterizadas las opciones tecnológicas se realizó la técnica de normalización de datos, que ayuda a prevenir los errores lógicos asociados a manipulación y permite realizar comparaciones en términos de la unidad (Romero, 1997). Posterior a esto se implementó el Grey Relational analysis (GRA), estimando el primer coeficiente que relaciona el esquema de referencia, es decir las opciones tecnológicas a seleccionar, y el esquema optativo de indicadores (Tabla 8-25).

**Tabla 8-25 Normalización de datos crudos y estimación de primer coeficiente relacional gris**

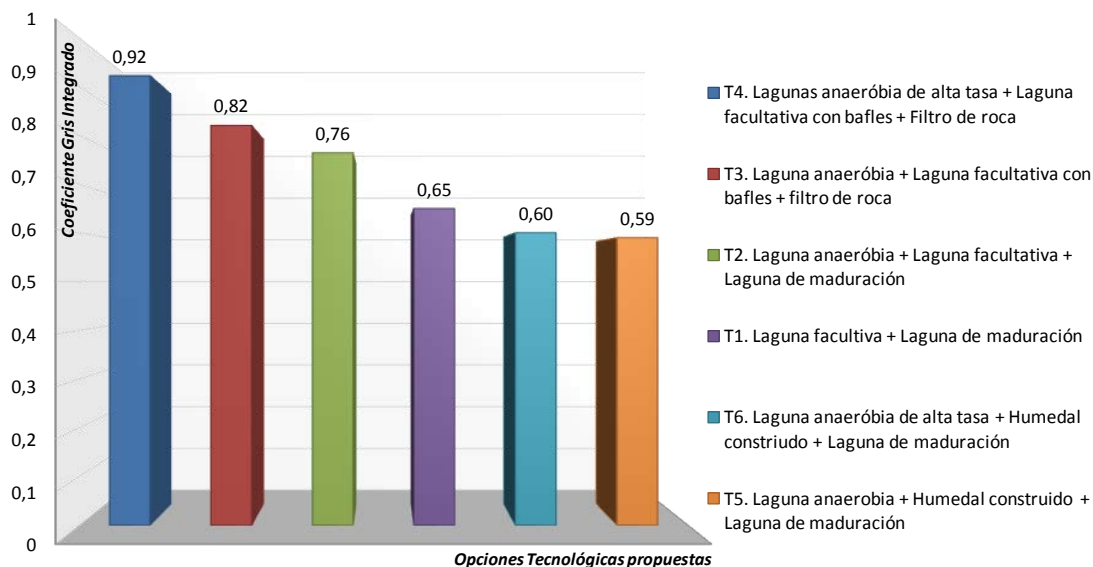
Criterio	Indicador	Normalización						Primer coeficiente relacional gris					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Técnico	I1	0,48	0,72	0,92	0,90	0,56	1,00	0,49	0,64	0,86	0,84	0,53	1,00
	I2	0,30	0,25	0,58	0,55	1,00	1,00	0,42	0,40	0,54	0,52	1,00	1,00
	I3	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,33	1,00	0,33
Ambiental	I4	0,00	0,00	0,10	0,10	1,00	1,00	0,33	0,33	0,36	0,36	1,00	1,00
	I5	0,72	0,42	0,42	0,42	1,00	1,00	0,64	0,46	0,46	0,46	1,00	1,00
Económico	I6	0,61	1,00	0,98	0,96	0,56	0,56	0,56	1,00	0,95	0,92	0,53	0,53
	I7	0,61	1,00	0,98	0,96	0,56	0,56	0,56	1,00	0,95	0,92	0,53	0,53
Sociocultural	I8	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	0,43	0,43	0,43	0,43
	I9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

La estimación del segundo coeficiente gris permitió relacionar el esquema de referencia (opciones tecnológicas) y el esquema optativo de criterios. Para su estimación fue necesario normalizar el primer coeficiente relacional gris, tal como se realizó con los datos crudos y ponderar el resultado por el peso relativo de cada criterio (Tabla 8-26).

**Tabla 8-26 Estimación del segundo coeficiente relacional gris**

Criterio	1er. Coeficiente relacional gris ponderado						Normalización 1er Coeficiente gris ponderado						2do Coeficiente relacional gris					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T1	T2	T3	T4	T5	T6
C1	0,61	0,65	0,77	0,56	0,86	0,80	0,91	0,86	0,72	1,00	0,65	0,70	0,78	0,68	0,52	1,00	0,46	0,50
C2	0,47	0,39	0,40	0,40	1,00	1,00	0,83	1,00	0,97	0,97	0,39	0,39	0,65	1,00	0,90	0,90	0,33	0,33
C3	0,56	1,00	0,95	0,92	0,53	0,53	0,95	0,53	0,56	0,58	0,99	1,00	0,85	0,39	0,40	0,41	0,98	1,00
C4	1,00	1,00	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	1,00	1,00	1,00	1,00	0,53	0,53	1,00	1,00	1,00	1,00

Se obtuvo el vector gris integrado, que relaciona el esquema de referencia y la ponderación de las alternativas con base en el peso relativo de cada criterio, esto permitió estimar un peso ponderado a cada opción tecnológica frente a los criterios escogidos para la selección. Este último paso aprobó como opción de tratamiento de la futura zona de expansión de Cali la tecnología compuesta por la laguna anaerobia de alta tasa, la laguna facultativa y el filtro de roca -T4 (Figura 8-16).



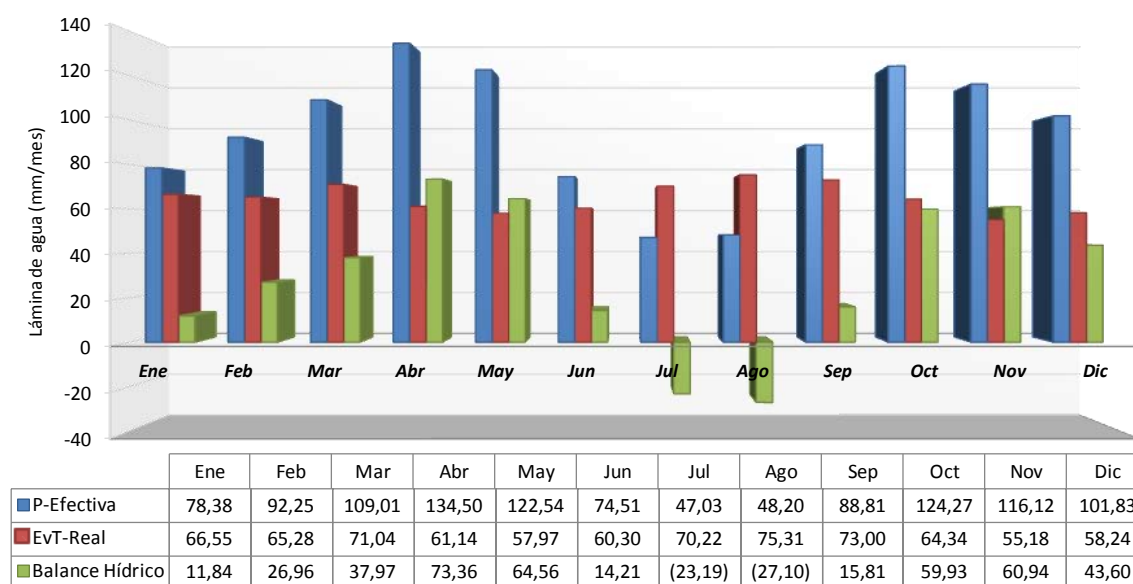
**Figura 8-16 Jerarquización de las opciones tecnológicas de tratamiento de agua residual de la zona de expansión con base en el segundo coeficiente relacional gris integrado**

✓ Definición del plan agrícola para la implementación de reuso de agua residual tratada

Así como la adecuada selección de tecnología de tratamiento de agua residual es un componente clave en el manejo del recurso hídrico, la definición del plan agrícola es un elemento indispensable en la implementación del reuso agrícola, este permite determinar potencialidad de riego en función de múltiples parámetros. La definición del plan agrícola para la zona de expansión se realizó de manera similar al caso de estudio evaluado para el manejo del agua residual efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo teniendo en cuenta solo dos aspectos, primero, la definición del área potencial de riego y segundo, el requerimiento hídrico del cultivo. Solo se tuvieron en cuenta estas actividades, dado que en el contexto local evaluado se evidencia la presencia de prácticas de monocultivo de caña de azúcar en un 58,14% (que corresponde a 186.441 ha) del valle geográfico del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca (CVC, 2010), lo que sugiere que el plan agrícola se encuentra ampliamente desarrollado por el sector y en términos de evaluación de reuso agrícola es suficiente la definición de solo las actividades citadas.

La selección del área potencial para riego, surge en primera instancia de las necesidades de agua de los cultivos. Bajo esta condición se realizó el estimativo de estas necesidades

mediante el balance hídrico simplificado (Sokolov y Chapman, 1981), donde se logró determinar la temporalidad y la cantidad requerida de agua para riego (Figura 8-17). Los datos climatológicos necesarios para la estimación del balance hídrico simplificado, se tomaron de la estación de referencia El Palacio, ubicada en la cuenca del río Jamundí, por ser representativa del área de expansión, con un periodo de de registro de 40 años (1970-actual) y con una escala de agregación mensual multianual.



**Figura 8-17 Estimación de demanda de agua mediante metodología de balance hídrico simplificado en la zona de expansión de Cali.**

De los resultados del balance hídrico se observa que el reuso de agua residual tratada presenta una temporalidad de 62 días/año en los meses de julio y agosto, donde se presenta el déficit o balance hídrico negativo (Figura 8-17). Según los estimativos realizados, la oferta de agua residual de la zona de expansión del municipio de Cali (0,850 m<sup>3</sup>/s) suple el requerimiento hídrico de los cultivos en un 100% bajo un escenario de área potencial de riego 2.530 ha. Este escenario fue obtenido mediante la estimación de modulo de riego para la zona evaluada que corresponde a 0,34L/s-ha. Lo cual garantiza en función de la oferta de agua residual y el requerimiento hídrico del cultivo, la reutilización del 100% del recurso y mínimas afectaciones a las fuentes hídricas por no realizarse las descargas de agua residual en este periodo deficitario.

Sin embargo para la validación del área potencial de riego estimada, se consideraron cinco criterios adicionales: 1. La proximidad al punto de entrega de agua residual del sistema de tratamiento, 2. El uso actual (caña de azúcar), 3. Las pendientes que favorezca el riego por gravedad, 4. El cerramiento por vías principales y 5. La vulnerabilidad del sistema acuífero (Foster *et al.*, 2003), esta última considerando que la zona de estudio presenta una excelente reserva de agua subterránea en términos de calidad de agua y estimada en 10.000 Mm<sup>3</sup>, de

donde el 12% de la recarga promedio anual ( $3500 \text{ Mm}^3$ ) de este sistema es empleado para riego de caña de azúcar (CVC, 2010).

Bajo estos criterios, se realizó el proceso de validación del área potencial de riego como producto de intercepciones cartográficas con apoyo del software ArcGIS versión 9.0., considerando el uso actual del suelo como caña de azúcar y la vulnerabilidad del acuífero como baja. La definición del área de riego, permitió observar que la potencialidad del reuso del agua residual en la agricultura depende no solo de los factores de la calidad del agua, sino también del contexto y las limitantes físicas que posea el sistema (Figura 8-18). Para este caso de estudio, fue posible validar el área potencial de riego bajo los criterios establecidos y por tanto no se generaron escenarios de área de riego.

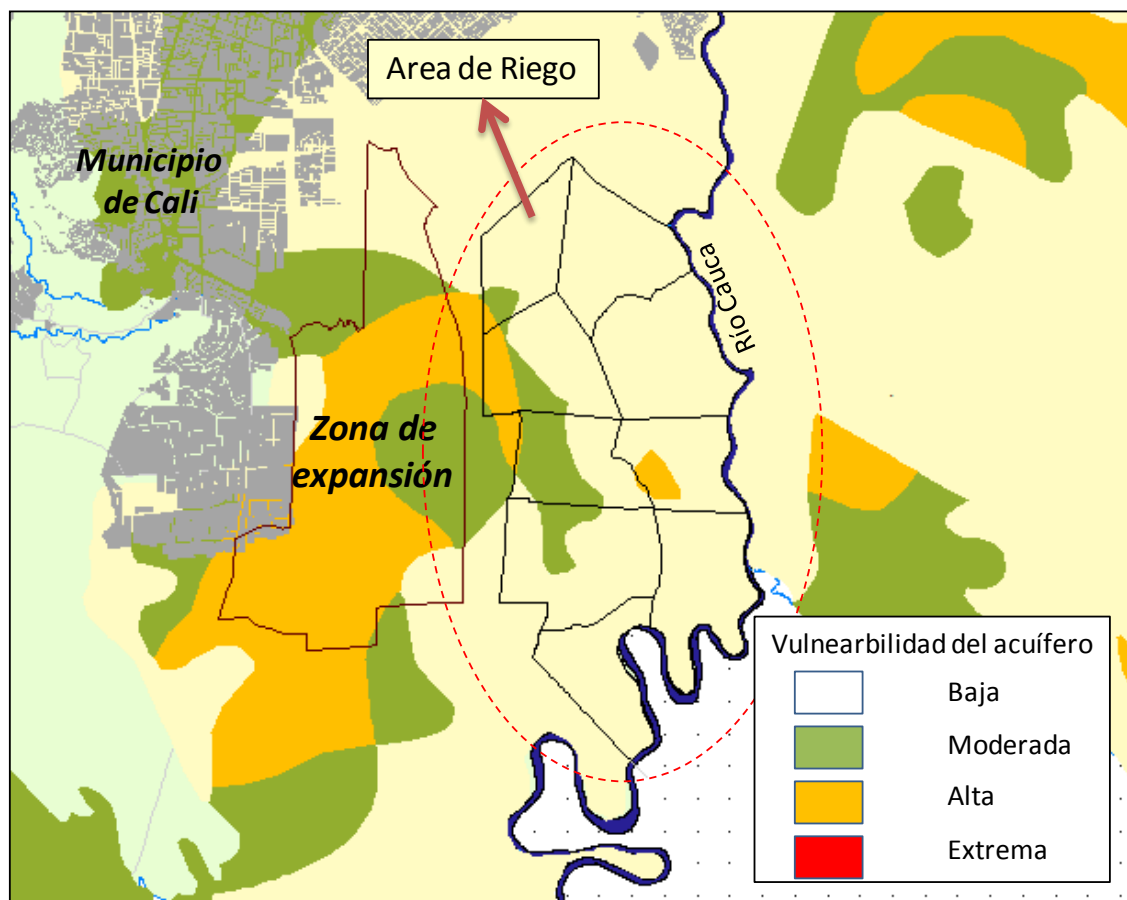


Figura 8-18 Validación del área potencial de riego en el caso de la implementación del reuso agrícola en la zona de expansión del municipio de Cali.

✓ Estimación de costos de la *Solución Alternativa*

Los costos identificados para la *Solución Alternativa* fueron discriminados en costos de inversión inicial y costos de operación y mantenimiento y se estimaron con base en los



precios de mercado de 2010. Los elementos que conforman la *Solución Alternativa* son: el sistema de tratamiento descentralizado de agua residual doméstica que corresponde a la opción tecnológica T4 (combinación de laguna anaerobia de alta tasa, una laguna facultativa con bables y un filtro de roca), un sistema de conducción y distribución de agua para riego y un sistema de bombeo

C1. Costo del sistema de tratamiento descentralizado de agua residual doméstica: Con respecto al sistema de tratamiento de aguas residuales, los costos de inversión inicial fueron estimados a partir de ítems o actividades gruesas y de gran relevancia dentro de los costos tales como: costo de terreno, geomembrana, geotextil, grava, etc (Anexo 6). El valor asumido para cada uno de estos ítems es el establecido por la gobernación del Valle del Cauca a través de Decreto No. 0532 de 03 de mayo de 2010. Los costos de operación y mantenimiento fueron calculados con base en el modelo de costos de Von Sperlling, citado por WHO (2006). Así el costos son de \$12.033 millones y \$601 millones en inversión inicial y operación y mantenimiento respectivamente.

Para este caso de estudio se propuso un sistema de tratamiento descentralizado considerando la topografía de la zona de estudio. Los costos citados anteriormente fueron estimados con el predimensionamiento para la mitad del caudal. Las inversiones en saneamiento se realizarán conforme a la tasa de ocupación de la zona de expansión para la cual se consideró, bajo esta investigación, dividir las inversiones del tratamiento de agua residual en dos instantes, en el año 1 y en el año 10 del horizonte de análisis.

C2. Costos del sistema de conducción y distribución de agua residual tratada para riego: Para la estimación de los costos del sistema de conducción y distribución del agua residual tratada en la zona de expansión para uso agrícola, fue necesario determinar el requerimiento hídrico del cultivo (caña de azúcar) y con esto se realizó el predimensionamiento del sistema. Con base en la información climatológica de la zona de estudio, el modulo de riego encontrado fue de 0,34 L/s-ha. Considerando el escenario de área de riego propuesto (2.500 ha), se estableció que el caudal de diseño del sistema de riego es de 0,850 m<sup>3</sup>/s, estimativos realizados para el mes de agosto, mes crítico deficitario.

Con este caudal de diseño, se realizó el trazado de la red de conducción y distribución considerando la topografía de la zona, los límites físicos del sistema (ríos y vías) y las demandas requeridas de los usuarios existentes (cultivadores de caña). Una vez trazada la red se realizaron escenarios de dimensionamiento de tuberías con el apoyo de la herramienta EPANET versión 2.0 El detalle de dimensionamiento del sistema se presenta en el Anexo 5.

Así los costos estimados de inversión inicial del sistema de conducción y distribución del agua residual tratada para riego agrícola fueron de \$1.968 millones. De acuerdo con la firma COLPOZOS S.A. (2010) el modelo de costos de operación mantenimiento para los sistemas de riego en el Valle del Cauca establece un costo del 5% de la inversión inicial del sistema (\$98 millones).



C3. Costos del sistema de bombeo: Una vez estimado el caudal total del sistema y la carga hidráulica dinámica total, se seleccionó el conjunto bomba-motor de 152,3 HP que cumple con los requerimientos del sistema (Anexo 5.). El costo de inversión inicial es de \$27 millones (COLPOZOS S.A). Los costos de operación se estimaron con base en el requerimiento energético considerando un tiempo de operación de 25 días. Si se considera que el costo de un 1Kw/h es de \$300, el costo de operación anual del sistema fue de \$91 millones. Los costos asociados al mantenimiento del sistema se determinaron bajo el modelo de costos implementado por COLPOZOS, como un 5% del costo de operación.

#### 8.2.2.3 *Potencialidad del reuso agrícola con el efluente de planta de tratamiento de agua residual de implementado en la zona de expansión del municipio de Cali*

La potencialidad del reuso agrícola con el efluente del sistema de tratamiento descentralizado propuesto para la zona de expansión del municipio de Cali, se realizó conforme a la metodología de evaluación socioeconómica de (Miranda, 2000). Para éste caso de estudio la *Situación Incremental* evaluada incluye tres elementos necesarios para su implementación: la unidad de tratamiento terciario no presente en la *Solución Convencional (filtro de roca)*, un sistema de bombeo y un sistema de conducción y distribución del agua residual para riego.

Los costos, los beneficios y los indicadores de viabilidad fueron evaluados a 30 años, periodo en el cual se consideran aspectos como vida útil y tiempo de reposición. La Tabla 8-27 cita los costos y beneficios identificados para cada solución y para la *Situación Incremental* sobre la cual se realizó la evaluación socioeconómica, presenta además cada actor relacionado con la implementación del reuso agrícola.

**Tabla 8-27 Costos y beneficios identificados en la implementación del reuso agrícola.**

Costos		Solución Convencional	Solución Alternativa	Situación Incremental	Actor
C1	Invesrsión inicial del sistema tratamiento de agua residual doméstica	SI	SI	SI (solo la unidad de tratamiento terciario)	Empresa prestadora de servicios públicos y municipio.
C2	Inversión inicial sistema del transporte y distribución de agua.	NO	SI	SI	Sector agrícola
C3	Inversión inicial estación de bombeo de agua residual tratada.	NO	SI	SI	Sector Agrícola
C4	Costos de O&M del sistema de tratamiento de agua residual doméstica	SI	SI	SI (solo la unidad de tratamiento terciario)	Empresa prestadora de servicios públicos y municipio.
C5	Costos de O&M del sistema de conducción y distribución de agua para riego	NO	SI	SI	Sector Agrícola
C6	Costos de O&M del sistema de transporte y distribución de agua para riego.	NO	SI	SI	Sector Agrícola

**Continuación Tabla 8-25**

	Beneficios	Solución Convencional	Solución Alternativa	Situación Incremental	Actor
B1	Ahorro por menor uso de fertilizantes	NO	SI	SI	Sector Agrícola
B2	Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental	NO	SI	SI	Empresa prestadora de servicios públicos y municipio.
B3	Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental	NO	SI	SI	Sector agrícola
B4	Ahorro en infraestructura para riego. Pozos profundos de agua subterránea	NO	SI	SI	Sector Agrícola
B5	Aumento de la calidad del cuerpo Hidrico Receptor	NO	SI	Sin estimación financiera	Sociedad en general

✓ Estimación de costos en la *Situación Incremental*

Los costos estimados para la implementación de reuso agrícola fueron discriminados en costos de inversión inicial y costos de operación y mantenimiento considerando los precios de mercado del año 2010. Con base en la Tabla 8-27, los costos asociados a inversión inicial (C1) y operación y mantenimiento del tratamiento propuesto para la zona de expansión (C5) corresponden a la unidad de tratamiento adicional para reuso agrícola, es decir el filtro de roca diseñado bajo las condiciones del agua residual de referencia para este caso de estudio con un caudal de 850 L/s. En este sentido, los costos estimados para la implementación del reuso agrícola se presentan en la Tabla 8-28, descritos en la caracterización de la *Solución Alternativa*.

**Tabla 8-28 Resumen de costos de implementación reuso agrícola con el efluente del sistema de tratamiento propuesto para la zona de expansión del municipio de Cali.**

C	Elemento	Costos (millones de pesos)
C1	Inversión inicial de la unidad de tratamiento terciario (x1)	5.487
C2	Inversión inicial del sistema de conducción y distribución de agua	1.968
C3	Inversión inicial de la estación de bombeo de agua residual tratada	27
C4	Costos de O&M de la unidad de tratamiento terciario (x1)	274
C5	Costos de O&M del sistema de conducción y distribución de agua para riego	98
C6	Costos de O&M de la estación de bombeo de agua residual tratada	4,5

✓ Estimación de beneficios en la *Situación Incremental*

Dado que la zona de expansión es una zona de futuro desarrollo, la estimación de los beneficios se razonó en función de la tasa de poblamiento del sector. Para ello se adoptó una tasa constante en el periodo de análisis de la evaluación socio económica, considerando un 10% de habitantes cada año sobre una base de población determinada por los planes parciales del municipio. Con base en este escenario se determinó el caudal de agua residual que se producirá en la zona como el 80% del caudal de agua potable como función de la

población. La determinación de la proyección de caudal de agua residual permitió estimar los beneficios que se presentan a continuación:

**B1. Ahorro por menor uso de fertilizantes:** Considerando que el área de riego con el efluente del sistema de tratamiento propuesto es de 2.500 ha, las necesidades de fertilizantes estimadas fueron de 408 bultos de UREA/año y 233bultos de NPK/año. Estas necesidades se estimaron con base a la necesidad por hectárea reportada por el (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

Para la estimación de este beneficio se debe contemplar el aporte de carga nutricional de que puede ofrecer el agua efluente en función su concentración de nitrógeno y fósforo. Para este caso específico, se verificó que el agua residual aporta el 100% de las necesidades nutricionales de la caña de azúcar. La cuantificación económica de este beneficio se realizó considerando el costo por bulto de fertilizante (NPK= \$61.650; y UREA= \$67.350) multiplicado por el área de riego potencial (Tabla 8-29).

**Tabla 8-29 Estimación del beneficio “Ahorro por menor uso de fertilizantes” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para la zona de expansión del municipio de Cali.**

Item/Año	1	5	10	15	20	25	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	-	-	26,01	58,52	91,03	123,54	130,05
Ahorro (Millones de \$)	-	-	26,01	58,52	91,03	123,54	130,05

**B2. Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental:** Para calcular este beneficio se emplearon precios de 2010 sobre la base de la estructura instrumento económico de la Tasa Retributiva (TR), que es una estimación del flujo de descarga en el río, las concentraciones de DBO y SST y el tiempo de descarga. Este instrumento se rige por el Decreto 3100 (MAVDT, 2003) que considera un costo asociado a la contaminación puntual de 106,5 \$/kg DBO<sub>5</sub> y 45,5 \$/kg SST. La estimación de beneficio se muestra en la Tabla 8-30 para cada cinco años.

**Tabla 8-30 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para la zona de expansión del municipio de Cali.**

Item/Año	1	5	10	15	20	25	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	-	2,30	4,60	6,90	8,34	8,34	8,34
Ahorro (Millones de \$)	-	2,30	4,60	6,90	8,34	8,34	8,34

**B3 Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental:** La estimación de este beneficio se realizó con precios de 2010, basada en la estructura del instrumento económico Tasa por Uso del Agua (TUA), la cual depende del volumen extraído para riego y del costo establecido por m<sup>3</sup> de agua subterránea, que corresponde a 1,26 \$/m<sup>3</sup> (CVC 2009). La Tabla 8-31 presenta la estimación realizada para las soluciones consideradas.

**Tabla 8-31 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para la zona de expansión del municipio de Cali.**

Item/Año	1	5	7	10	15	20	25	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	-	0,38	0,77	1,15	1,31	1,31	1,31	-
Ahorro (Millones de \$)	-	0,38	0,77	1,15	1,31	1,31	1,31	-

**B4 Ahorro en infraestructura para riego. Pozos profundos de agua subterránea:** De acuerdo con los resultados obtenidos, el caudal de riego estimado para la zona es de 850 L/s, de acuerdo con las características hidrogeológicas de la zona para la extracción de este caudal es necesaria la construcción de 11 pozos con profundidad de 150 m, con un caudal de bombeo de 80 L/s y un costo unitario de \$300 millones (COLPOZOS, 2010). El valor total de la inversión en la construcción fue distribuida en el horizonte del proyecto, debido al escenario de población considerado para esta investigación. Así mismo se consideró como un beneficio asociado a la implementación del reuso agrícola el costo evitado por la no operación y mantenimiento de los pozos de profundos. Así, teniendo en cuenta que la potencia requerida para cada pozo descrito es de 75HP con un tiempo de operación de 18 h y un costo de \$300 Kw-h. Se estimo así, un costo de operación \$36 millones (COLPOZOS, 2010).

Adicional a esto, de acuerdo con el modelo de costos de mantenimiento utilizado por la (COLPOZOS 2010a), el 5% del costo de operación es asumido como un costo de mantenimiento. Por tanto el beneficio asociado al mantenimiento anual fue de \$1.8 millones (Tabla 8-32).

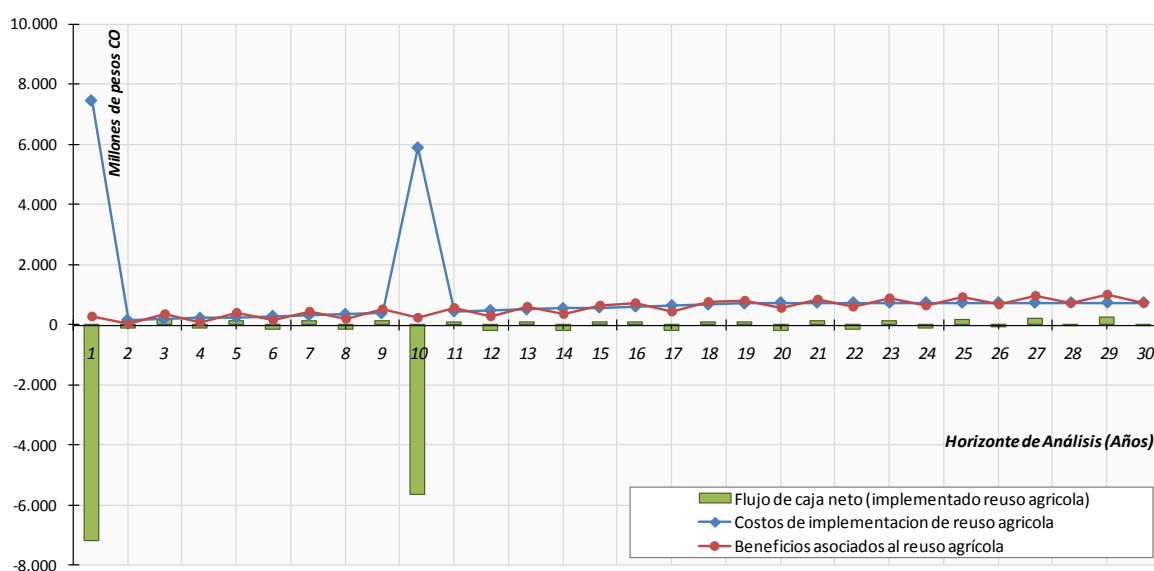
**Tabla 8-32 Estimación del beneficio “Ahorro en infraestructura para riego” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para la zona de expansión del municipio de Cali.**

Item/Año	1	5	10	15	20	25	27	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	300,00	376,03	190,09	566,12	418,19	794,23	608,28	300,00
Ahorro (Millones de \$)	300,00	376,03	190,09	566,12	418,19	794,23	608,28	300,00

#### ✓ Estimacion de indicadores de viabilidad

Estimados los costos y beneficios de implementar el reuso agrícola como una estrategia para el control de la contaminación, se valoraron los criterios de viabilidad, eficiencia económica y la relación beneficio/costo (Brent 2006). El periodo de análisis considerado fue de 30 años, periodo que tuvo en cuenta los tiempos de vida útil y tiempos de reposición de los diferentes componentes presentados en la *Situación Incremental*. Con objeto de presentación, en la Tabla 8-33 se muestra el análisis temporal de flujo de costos y beneficios en el periodo de análisis, fraccionado en dos subperiodos. Dado el nivel de la investigación se resalta que los costos y beneficios estimados se consideran preliminares y se deberán adelantar prediseños y estimativos mas detallados en cuanto se profundice en la línea de investigación.

El indicador de eficiencia económica presentó un valor (-\$8.487 millones), que significa que los costos de implementar el reuso agrícola en la área periurbana de la zona de expansión son más altos que los beneficios. Para analizar este indicador en escala temporal se realizó la Figura 8-19, donde se observa que los costos de implementación de la *Solución Alternativa* formulada son máximos en el año 1 debido a la inversión inicial de la construcción de los sistemas de tratamiento terciario y el sistema de conducción y distribución de agua para riego. En el año 7 se presenta un segundo pico en el comportamiento de los costos dada la inversión de la segunda unidad de tratamiento terciario, la propuesta para esta zona corresponde a un sistema descentralizado. El comportamiento de los costos entre los años 2 y 9 y los años 11 y 30 es constante dado que solo se consideran los costos de operación y mantenimiento de los elementos propuestos



**Figura 8-19 Análisis temporal de costos y beneficios en la Situación Incremental.**

En cuanto al comportamiento de los beneficios de implementar el reuso agrícola se observan que estos nunca superan los costos de implementación. Esto obedece al comportamiento temporal de los parámetros climatológicos que favorecen la implementación del reuso solo 62 días de riego, y por ende no se perciben los beneficios en mayor porcentaje. Los beneficios relacionados presentan un leve ascenso desde el año 1 hasta el año 20 debido al escenario de ocupación propuesto para la zona de expansión. Apartir del año 20 estos beneficios son constantes hasta el último año del periodo de análisis, año en el cual se encuentra habitado en un 100% el sector caso de estudio.

El flujo de caja fue negativo en los años de inversión lo cual es un comportamiento típico, sin embargo se observa que el flujo de caja en todo el periodo de horizonte nunca iguala o supera los costos, significando que la implementación del reuso en este caso de estudio no lograr alcanzar un punto de equilibrio, esto hace que no sea viable la implementación del reuso en la zona de expansión de Cali, bajo las condiciones evaluadas en esta investigación.

**Tabla 8-33 Costos, beneficios y flujo de caja neto de la implementación de reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo como estrategia para el control de la contaminación hídrica.**

Periodo de análisis (Año 1 a 15)															
Costos/Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C1	5.487,82	-	-	-	-	-	-	-	-	5.487,82	-	-	-	-	-
C2	1.968,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	27,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C4	-	54,88	82,32	109,76	137,20	164,63	192,07	219,51	246,95	274,39	301,83	329,27	356,71	384,15	411,59
C5	-	9,84	14,76	19,68	24,60	29,52	34,44	39,36	44,28	49,21	54,13	59,05	63,97	68,89	73,81
C6	-	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64
<b>Total Costos</b>	<b>7.483,72</b>	<b>164,36</b>	<b>196,72</b>	<b>229,08</b>	<b>261,44</b>	<b>293,80</b>	<b>326,16</b>	<b>358,52</b>	<b>390,88</b>	<b>5.911,06</b>	<b>455,60</b>	<b>487,96</b>	<b>520,32</b>	<b>552,68</b>	<b>585,04</b>
Beneficio/Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
B1	-	6,50	13,00	19,51	26,01	32,51	39,01	45,51	52,02	58,52	65,02	71,52	78,03	84,53	91,03
B2	-	0,92	1,38	1,84	2,30	2,76	3,22	3,68	4,14	4,60	5,06	5,52	5,98	6,44	6,90
B3	-	0,15	0,23	0,31	0,38	0,46	0,54	0,61	0,69	0,77	0,84	0,92	1,00	1,07	1,15
B4	300,00	38,02	338,02	76,03	376,03	114,05	414,05	152,07	452,07	190,09	490,09	228,10	528,10	266,12	566,12
<b>Total Beneficios</b>	<b>300,00</b>	<b>45,59</b>	<b>352,63</b>	<b>97,69</b>	<b>404,73</b>	<b>149,78</b>	<b>456,82</b>	<b>201,88</b>	<b>508,92</b>	<b>253,97</b>	<b>561,01</b>	<b>306,07</b>	<b>613,11</b>	<b>358,16</b>	<b>665,20</b>
<b>Flujo de caja</b>	<b>(7.183,72)</b>	<b>(118,77)</b>	<b>155,91</b>	<b>(131,39)</b>	<b>143,29</b>	<b>(144,02)</b>	<b>130,66</b>	<b>(156,64)</b>	<b>118,04</b>	<b>(5.657,08)</b>	<b>105,41</b>	<b>(181,89)</b>	<b>92,79</b>	<b>(194,51)</b>	<b>80,17</b>

Periodo de análisis (Año 16 a 30)															
Costos/Año	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
C1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C4	439,03	466,46	493,90	521,34	548,78	548,78	548,78	548,78	548,78	548,78	548,78	548,78	548,78	548,78	548,78
C5	78,73	83,65	88,57	93,49	98,41	98,41	98,41	98,41	98,41	98,41	98,41	98,41	98,41	98,41	98,41
C6	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64	99,64
<b>Total Costos</b>	<b>617,40</b>	<b>649,76</b>	<b>682,12</b>	<b>714,48</b>	<b>746,84</b>	<b>746,84</b>	<b>746,84</b>	<b>746,84</b>	<b>746,84</b>	<b>746,84</b>	<b>746,84</b>	<b>746,84</b>	<b>746,84</b>	<b>746,84</b>	<b>746,84</b>
Beneficio/Año															
B1	97,53	104,03	110,54	117,04	123,54	130,04	130,05	130,05	130,05	130,05	130,05	130,05	130,05	130,05	130,05
B2	7,36	7,82	7,88	8,11	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34
B3	1,23	1,30	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
B4	604,14	342,16	642,16	680,17	418,19	718,19	456,21	756,21	494,23	794,23	532,24	832,24	570,26	870,26	608,28
<b>Total Beneficios</b>	<b>710,26</b>	<b>455,32</b>	<b>761,88</b>	<b>806,63</b>	<b>551,38</b>	<b>857,88</b>	<b>595,90</b>	<b>895,90</b>	<b>633,92</b>	<b>933,92</b>	<b>671,94</b>	<b>971,94</b>	<b>709,96</b>	<b>1.009,96</b>	<b>747,97</b>
<b>Flujo de caja</b>	<b>92,86</b>	<b>(194,44)</b>	<b>79,76</b>	<b>92,15</b>	<b>(195,46)</b>	<b>111,05</b>	<b>(150,93)</b>	<b>149,07</b>	<b>(112,91)</b>	<b>187,09</b>	<b>(74,90)</b>	<b>225,10</b>	<b>(36,88)</b>	<b>263,12</b>	<b>1,14</b>

En cuanto al indicador relación beneficio-costo, éste presentó un valor de inferior a la unidad Tabla 8-34 que en términos socioeconómicos permite aseverar, bajo los factores evaluados en esta investigación, el reuso agrícola no presenta una viabilidad financiera. Sin embargo, para completar la evaluación será necesario realizar un perfeccionamiento de los precios de mercado con los cuales se realizaron todas las estimaciones de costos.

**Tabla 8-34 Indicadores de viabilidad socioeconómica de la implementación de reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**

Inidcadores de viabilidad socioeconómica	Valor
VPN de los costos incrementales (millones de pesos)	11.765
VPN de los beneficios (millones de pesos)	3.278
Flujo de caja $VPN_{Beneficios} - VPN_{Costos}$ (millones de pesos)	8.487
Relacion Costo / beneficio (adimensional)	0,27

### **8.2.3 Caso de estudio: Municipio de Buga**

#### **8.2.3.1 Descripción de la Solución Convencional para el manejo del agua residual doméstica en el municipio de Buga**

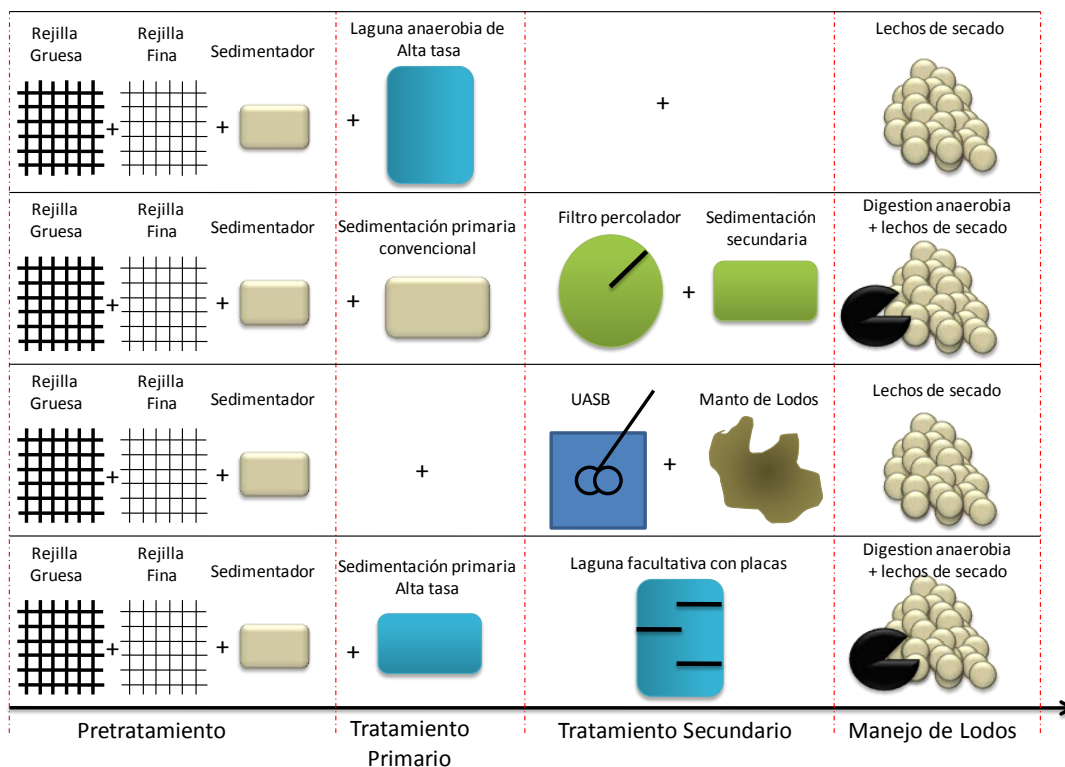
La conceptualización de la solución convencional para el municipio de Buga se basó en el proceso de investigación desarrollado por la Universidad del Valle y la CVC en el año 2007, para la selección de tecnología de tratamiento del agua residual doméstica de este municipio. El proceso de selección de tecnología de tratamiento de agua residual doméstica se desarrolló en dos etapas. En la primera se realizó una selección preliminar utilizando una metodología multibarrera, en la cual se identificaron los diferentes aspectos que son limitantes de la tecnología. Los factores evaluados fueron: Objetivos ambientales, aspectos tecnológicos y manejo de lodos. En la segunda etapa se realizó una jerarquización de las tecnologías seleccionadas hasta el nivel anterior, se consideraron nuevamente aspectos tecnológicos, ambientales y de costos.

Los esquemas tecnológicos fueron formulados a partir de las tecnologías caracterizadas para el tratamiento por métodos naturales, tecnologías convencionales, tecnologías para el manejo de lodos y considerando el reuso de agua residual. La preselección tecnológica comenzó con un universo de 54 esquemas tecnológicos, donde se consideraron opciones específicas para el municipio de Buga propuestas por la Autoridad Ambiental y algunos consultores, además de propuestas realizadas en las publicaciones de Von Sperling (2005) y experiencias del Instituto CINARA.

Para la selección de tecnología se definieron como primera etapa los objetivos de tratamiento, que desempeñan un rol fundamental en la sostenibilidad de los sistemas de control de contaminación hídrica. Con base a los objetivos de tratamiento, el universo de estrategias se redujo a quince, las cuales se evaluaron considerando algunos aspectos socio culturales como son: disponibilidad de recursos humanos y materiales, acceso al centro urbano regional, capacidad de gestión institucional y comunitaria, cultura sobre el manejo del agua residual y sus subproductos. En este sentido del análisis anterior la preselección no sufrió cambios, se considera que hasta este nivel de selección, el universo de quince tecnologías a evaluar se conserva.

Posteriormente se realizó un análisis de los aspectos tecnológicos considerando la cantidad y la calidad del agua residual, los requerimientos de área, las características del suelo en el sitio de la planta y los requerimientos energéticos. Con base a esto, el universo de tecnologías se redujo a cuatro (Figura 8-20), a las cuales se realizó la segunda etapa de análisis multicriterio, costos y jerarquización.





**Figura 8-20 Esquemas preseleccionados para el manejo de agua residual en el municipio de Buga.**  
**Fuente:** Adaptado de (CVC & Universidad del Valle, 2007).

De acuerdo con el análisis multicriterio realizado posteriormente, se definieron criterios de selección considerando aspectos constructivos, complejidad de la tecnología, aspectos ambientales como los olores producidos por el sistema de tratamiento y aspectos de costos. Los esquemas propuestos fueron jerarquizados para el cumplimiento de la normatividad en términos del 80% de la remoción de la carga doméstica dado como resultado el tren de tratamiento compuesto por unidades de pretratamiento (rejillas gruesas y finas), sedimentador y laguna anaerobia de alta tasa.

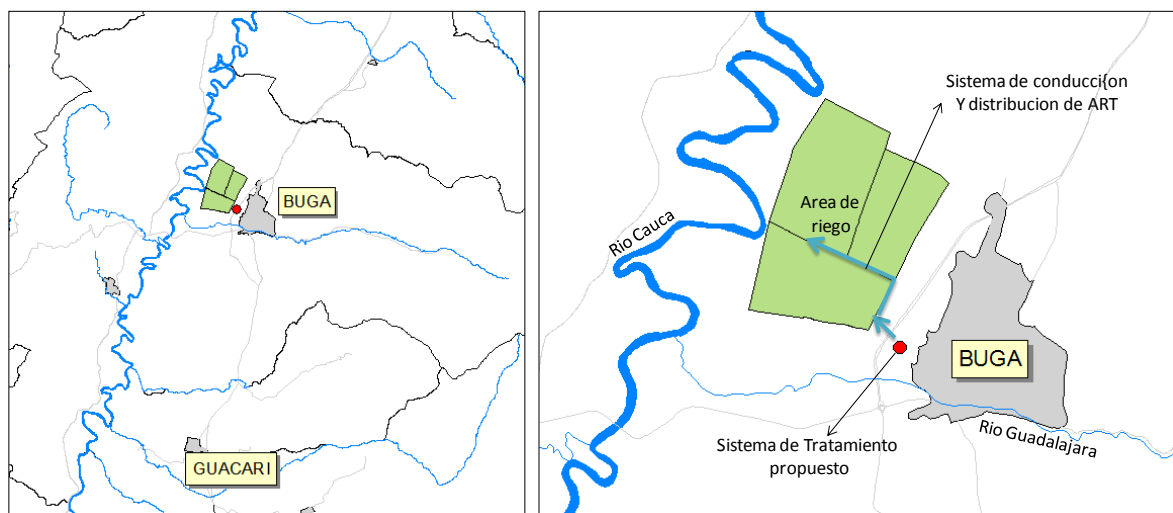
Así, la solución convencional para el manejo del agua residual de municipio de Buga consta de un sistema de tratamiento con disposición final del efluente al río Cauca. Los costos asociados a la Solución Convencional se estimaron con base en actividades gruesas y al predimensionamiento del sistema de tratamiento, considerando que es el único elemento diferencial con la solución Alternativa planteada, con una inversión inicial de \$11.182 millones y costos de operación y mantenimiento de \$559 millones. El requerimiento de área estimado para este sistema fue de 1,2 ha.

#### 8.2.3.2 Descripción de la Solución Alternativa para el manejo del agua residual doméstica en el municipio de Buga

- ✓ Caracterización de las opciones de *Solución Alternativa* para el manejo del agua residual doméstica en el municipio de Buga

La *Solución Alternativa* propuesta en este caso de estudio consiste en un sistema integrado de tratamiento que incluye la implementación de un sistema de tratamiento de

agua residual doméstica y el reuso del efluente de este sistema en el riego de caña de azúcar (Figura 8-21).



**Figura 8-21 Esquema de la Solución Alternativa propuesta para el manejo de agua residual doméstica en el municipio de Buga**

Tres opciones tecnológicas para el sistema de tratamiento de agua residual doméstica, fueron prediseñadas en el marco del proyecto de investigación de selección de tecnología y predimensionamiento hidráulico de tratamiento para el agua residuales de Buga (Universidad del Valle y CVC, 2007). El prediseño de estas opciones consideró como objetivo de tratamiento el reuso agrícola con énfasis en la aplicación de métodos naturales dada su demostrada eficiencia para el objetivo de tratamiento propuesto (Moscoso *et al.*, 2002) (Tabla 8-35).

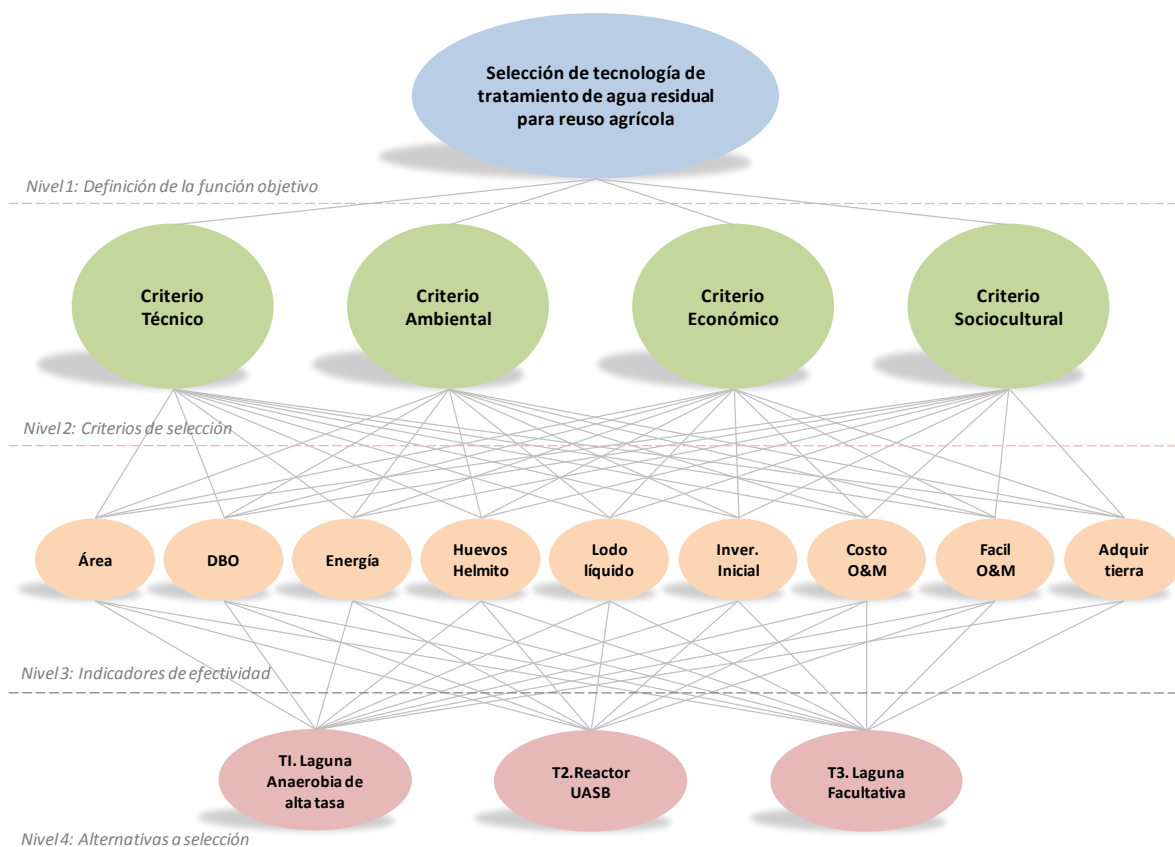
**Tabla 8-35 Dimensionamiento de las opciones de tratamiento en la Solución Alternativa para el manejo del agua residual en el caso del municipio de Buga**

T	Tecnología	Área (ha)	Longitud (m)	Ancho (m)
T1	Laguna Anaerobia de Alta Tasa	6,02	12	12
	Laguna Facultativa		190	63,3
T2	Reactor UASB	5,81	17,9	17,9
	Laguna Facultativa		201	67
T3	Laguna Facultativa + Laguna Facultativa	12,8	250	125

**Fuente: (Universidad del Valle y CVC, 2007)**

#### ✓ Selección de tecnología de tratamiento de agua residual

Para el tema específico de definición de criterios de selección de tecnología de tratamiento de agua residual considerando reuso agrícola, los criterios predominantes encontrados en la revisión de literatura, han sido el ambiental, el económico, el técnico y el sociocultural (Abbassi y Baz, 2008; Galvis *et al.*, 2007; Manga *et al.*, 2001; Metcalf y Eddy, 1995; Moscoso y Young, 2002). Para la formulación de la Solución Alternativa se implementaron el proceso de análisis jerárquico y el análisis relacional gris al igual que en el caso de estudio de manejo del agua residual de la planta de tratamiento de Cañaveralejo, este análisis fue descrito por Zeng *et al.*, (2007), y permitió seleccionar la tecnología de tratamiento de agua residual de municipio de Buga. El primer paso realizado fue la esquematización del modelo conceptual (Figura 8-22).



**Figura 8-22 Modelo conceptual de selección de tecnología de tratamiento con implementación con objetivo de reuso agrícola**

Para la formulación de criterios e indicadores de efectividad, se emplearon los resultados de la consulta con expertos desarrollada en el caso de Cali, donde se aprovechó la matriz de Saaty (Romero, 1997; Zeng *et al.*, 2007) para comparar el nivel de importancia de un criterio respecto al otro. La Tabla 8-36, presenta los resultados de este procedimiento.

**Tabla 8-36 Importancia de criterios e indicadores de selección de tecnología de tratamiento de agua residual con fines de reuso agrícola.**

Criterio		Peso	Indicador		Peso	Rank
C1	Técnico	0,21	I1	Requerimiento de área (ha)	0,300	2
			I2	Concentración de DBO en el agua residual (mg/l)	0,400	1
			I3	Requerimiento de energía (kw-h/hab-día)	0,300	3
C2	Ambiental	0,43	I4	Concentración de huevos de helminto (hh/l)	0,570	1
			I5	Producción de lodos (l-hab/año)	0,430	2
C3	Economico	0,06	I6	Costo de inversión inicial (millones euros)	0,436	2
			I7	Costo de O&M (millones euros)	0,564	1
C4	Sociocultural	0,30	I8	Facilidad de O&M (1=fácil, 2=intermedio, 3=complejo)	0,468	2
			I9	Tenencia de la tierra (1= propio, 2=adquisición de terreno)	0,532	1

Continuando con el proceso de selección, se aplicó el proceso de análisis jerárquico (AHP), donde se caracterizaron las seis opciones de tratamiento de agua residual en función de los indicadores propuestos (Tabla 8-37).

**Tabla 8-37 Caracterización de las opciones tecnológicas de tratamiento de agua residual conforme a los indicadores de efectividad**

Criterio		Indicador	T1	T2	T3
Técnico	I1	Requerimiento de área (ha)	6,01	5,82	123,00
	I2	Concentración de DBO en el agua residual (mg/L)	81,87	81,87	104,79
	I3	Requerimiento de energía (kW-h/hab-día) <sup>1</sup>	0,00	0,00	0,00
Ambiental	I4	Concentración de huevos de helminto en el agua residual (hh/L)	0,75	1,00	1,20
	I5	Producción de lodos (L-hab/año) <sup>1</sup>	107,50	207,50	655,60
Económico	I6	Costo de inversión inicial (millones de pesos)	13.801,00	17.845,00	18.474,00
	I7	Costo de O&M <sup>1</sup> (Miles de pesos)	1,15	2,40	3,05
	I8	Facilidad de O&M (1=Fácil, 2=Intermedio, 3=Complejo)	1,00	2,00	3,00
Sociocultural	I9	Tenencia de la tierra (1= Propio, 2=Adquisición de terreno)	2,00	3,00	2,00

Fuentes: <sup>1</sup> World Health Organization (2006). Los datos que no poseen superíndice se obtuvieron con base en el predimensionamiento de las alternativas en el marco de Universidad del Valle y CVC (2010).

Una vez caracterizadas las opciones tecnológicas se realizó la técnica de normalización de datos, que ayuda a prevenir los errores lógicos asociados a manipulación y permite realizar comparaciones en términos de la unidad (Romero, 1997). Posterior a esto se implementó el Grey Relational analysis (GRA), estimando el primer coeficiente que relaciona el esquema de referencia, es decir las opciones tecnológicas a seleccionar, y el esquema optativo de indicadores (Tabla 8-38).

La estimación del segundo coeficiente gris permitió relacionar el esquema de referencia (opciones tecnológicas) y el esquema optativo de criterios. Para su estimación fue necesario normalizar el primer coeficiente relacional gris, tal como se realizó con los datos crudos y ponderar el resultado por el peso relativo de cada criterio (Tabla 8-39).

**Tabla 8-38 Normalización de datos crudos y estimación de primer coeficiente relacional gris**

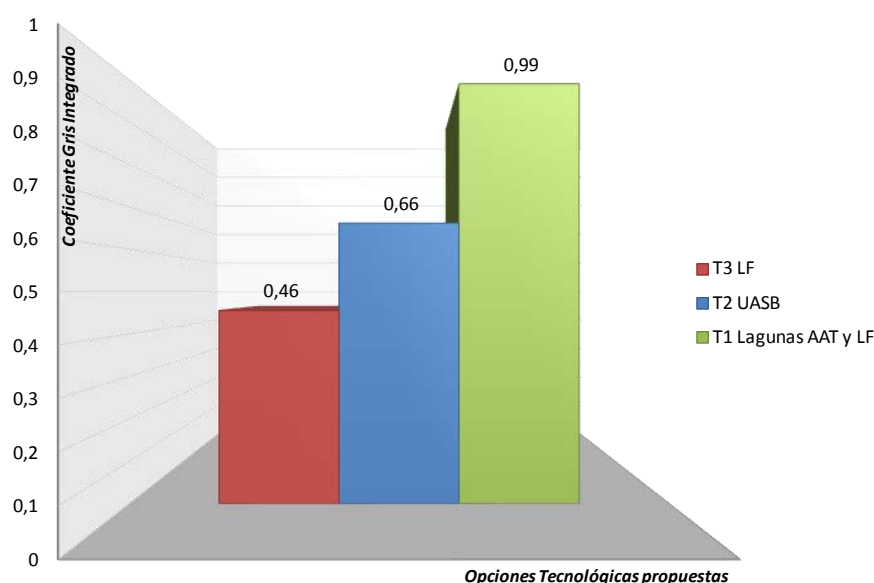
Criterio	Indicador	Normalización			Primer coeficiente relacional gris		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3
Técnico	I1	0,97	1,00	0,05	0,94	1,00	0,34
	I2	1,00	1,00	0,78	1,00	1,00	0,70
	I3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Ambiental	I4	1,00	0,75	0,63	1,00	0,67	0,57
	I5	1,00	0,52	0,16	1,00	0,51	0,37
Económico	I6	1,00	0,77	0,75	1,00	0,69	0,66
	I7	1,00	0,48	0,38	1,00	0,49	0,45
Sociocultural	I8	1,00	0,50	0,33	1,00	0,50	0,43
	I9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

**Tabla 8-39 Estimación del segundo coeficiente relacional gris**

Criterio	1er. Coeficiente relacional gris ponderado			Normalización 1er Coeficiente gris ponderado			2do Coeficiente relacional gris		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
C1	0,98	1,00	0,68	0,69	0,68	1,00	0,50	0,49	1,00

C2	1,00	0,60	0,49	0,49	0,81	1,00	0,37	0,62	1,00
C3	1,00	0,58	0,54	0,54	0,94	1,00	0,40	0,83	1,00
C4	1,00	0,77	0,73	0,73	0,96	1,00	0,53	0,87	1,00

Se obtuvo el vector gris integrado, que relaciona el esquema de referencia y la ponderación de las alternativas con base en el peso relativo de cada criterio, esto permitió estimar un peso ponderado a cada opción tecnológica frente a los criterios escogidos para la selección. Este último paso aprobó como opción de tratamiento para el municipio de Buga la tecnología compuesta por la laguna anaerobia de alta tasa y la laguna facultativa (Figura 8-23).



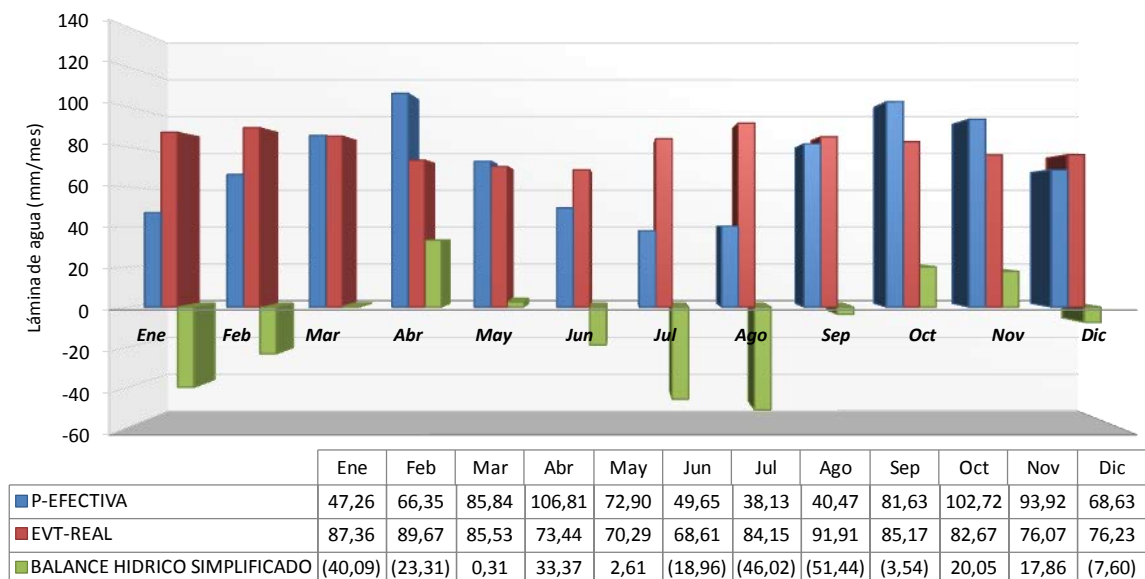
**Figura 8-23 Jerarquización de las opciones tecnológicas de tratamiento de agua residual para el municipio de Buga con base en el segundo coeficiente relacional gris integrado**

- ✓ Definición del plan agrícola para la implementación de reuso de agua residual tratada

Así como la adecuada selección de tecnología de tratamiento de agua residual es un componente clave en el manejo del recurso hídrico, la definición del plan agrícola es un elemento indispensable en la implementación del reuso agrícola, este permite determinar potencialidad de riego en función de múltiples parámetros. La definición del plan agrícola para el municipio de Buga se realizó de manera similar a los casos de estudio evaluados anteriormente, es decir, solo se tuvieron en cuenta los criterios de cultivo y área para la definición del plan, dado que en el contexto local evaluado se evidencia la presencia de prácticas de monocultivo, que sugiere que el plan agrícola se encuentra ampliamente desarrollado por el sector.

La selección del área potencial para riego, surge en primera instancia de las necesidades de agua de los cultivos. Bajo esta condición se realizó el estimativo de estas necesidades mediante el balance hídrico simplificado (Sokolov y Chapman, 1981), donde se logró determinar la temporalidad y la cantidad requerida de agua para riego (Figura 8-24). Los datos climatológicos necesarios para la estimación del balance hídrico simplificado, se tomaron de la estación de referencia Cenicaña, ubicada en la cuenca del río Guadalajara,

por ser representativa de municipio de Buga, con un periodo de de registro de 10 años y con una escala de agregación mensual multianual.



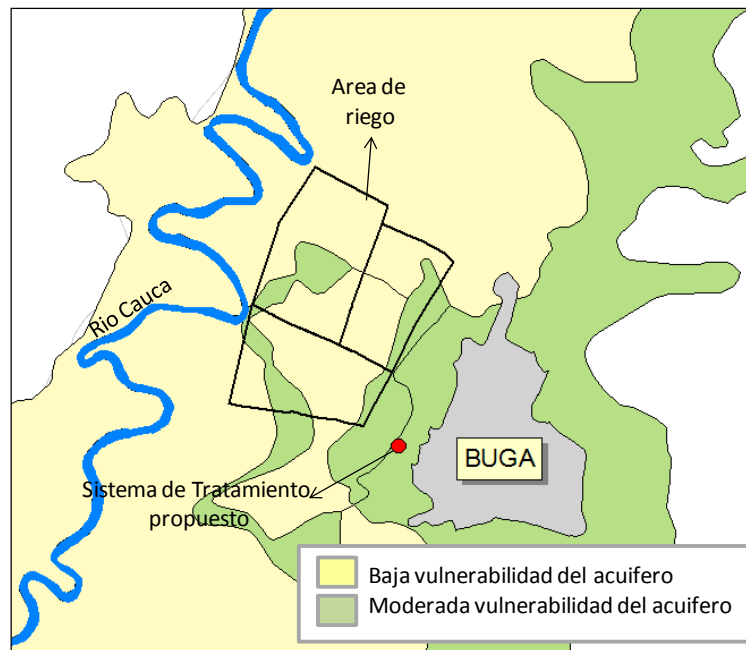
**Figura 8-24 Estimación de demanda de agua mediante metodología de balance hídrico simplificado en la zona de expansión de Cali.**

De los resultados del balance hídrico se observa que el reuso de agua residual tratada presenta una temporalidad de 212 días/año en los meses de enero, febrero, junio, julio, agosto y septiembre donde se presenta el déficit o balance hídrico negativo (Figura 8-24). Según los estimativos realizados, la oferta de agua residual del municipio de Buga ( $0,336 \text{ m}^3/\text{s}$ ) suple el requerimiento hídrico de los cultivos en un 100% bajo un escenario de área potencial de riego 524 ha. Este escenario fue obtenido mediante la estimación de modulo de riego para la zona evaluada que corresponde a  $0,64\text{L}/\text{s}\cdot\text{ha}$ . Lo cual garantiza en función de la oferta de agua residual y el requerimiento hídrico del cultivo, la reutilización del 100% del recurso y mínimas afectaciones a las fuentes hídricas por no realizarse las descargas de agua residual en este periodo deficitario.

Sin embargo para la validación del área potencial de riego estimada, se consideraron cinco criterios adicionales: 1. La proximidad al punto de entrega de agua residual del sistema de tratamiento, 2. El uso actual (caña de azúcar), 3. Las pendientes que favorezca el riego por gravedad, 4. El cerramiento por vías principales y 5. La vulnerabilidad del sistema acuífero (Foster *et al.*, 2003), esta última considerando que la zona de estudio presenta una excelente reserva de agua subterránea en términos de calidad de agua y estimada en  $10.000 \text{ Mm}^3$ , de donde el 12% de la recarga promedio anual ( $3500 \text{ Mm}^3$ ) de este sistema es empleado para riego de caña de azúcar (CVC, 2010).

Bajo estos criterios, se realizó el proceso de validación del área potencial de riego como producto de intercepciones cartográficas con apoyo del software ArcGIS versión 9.0., considerando el uso actual del suelo como caña de azúcar y la vulnerabilidad del acuífero como baja. La definición del área de riego, permitió observar que la potencialidad del reuso del agua residual en la agricultura depende no solo de los factores de la calidad del agua, sino también del contexto y las limitantes físicas que

posea el sistema (Figura 8-25). Para este caso de estudio, fue posible validar el área potencial de riego bajo los criterios establecidos y por tanto no se generaron escenarios de área de riego.



**Figura 8-25 Validación del área potencial de riego en el caso de la implementación del reuso agrícola en el caso de estudio del municipio de Buga.**

✓ Estimación de costos de la *Solución Alternativa*

Los costos identificados para la *Solución Alternativa* fueron discriminados en costos de inversión inicial y costos de operación y mantenimiento y se estimaron con base en los precios de mercado de 2010. Los elementos que conforman la *Solución Alternativa* son: el sistema de tratamiento de agua residual doméstica que corresponde a la opción tecnológica T1 (combinación de laguna anaerobia de alta tasa y una laguna facultativa con bables), un sistema de conducción y distribución de agua para riego y un sistema de bombeo

C1. Costo del sistema de tratamiento de agua residual doméstica: Con respecto al sistema de tratamiento de aguas residuales, los costos de inversión inicial fueron estimados a partir de ítems o actividades gruesas y de gran relevancia dentro de los costos tales como: costo de terreno, geomembrana, geotextil, grava, etc (Anexo 6). El valor asumido para cada uno de estos ítems es el establecido por la gobernación del Valle del Cauca a través de Decreto No. 0532 de 03 de mayo de 2010. Los costos de operación y mantenimiento fueron calculados con base en el modelo de costos de Von Sperlling, citado por WHO (2006). Así el costos son de \$13.801 millones y \$609 millones en inversión inicial y operación y mantenimiento respectivamente.

Las inversiones en saneamiento se realizarán conforme al desarrollo poblacional en el municipio de Buga para la cual se consideró, bajo esta investigación, realizar las inversiones del tratamiento de agua residual en el año 1 y en el año 10 del horizonte de análisis.



## C2. Costos del sistema de conducción y distribución de agua residual tratada para riego:

Para la estimación de los costos del sistema de conducción y distribución del agua residual tratada en el municipio de Buga, fue necesario determinar el requerimiento hídrico del cultivo (caña de azúcar) y con esto se realizó el predimensionamiento del sistema. Con base en la información climatológica de la zona de estudio, el modulo de riego encontrado fue de 0,64 L/s-ha. Considerando el escenario de área de riego propuesto (550 ha), se estableció que el caudal de diseño del sistema de riego es de 0,336 m<sup>3</sup>/s, estimativos realizados para el mes de agosto, mes crítico deficitario.

Con este caudal de diseño, se realizó el trazado de la red de conducción y distribución considerando la topografía de la zona, los límites físicos del sistema (ríos y vías) y las demandas requeridas de los usuarios existentes (cultivadores de caña). Una vez trazada la red se realizaron escenarios de dimensionamiento de tuberías con el apoyo de la herramienta EPANET versión 2.0 El detalle de dimensionamiento del sistema se presenta en el Anexo 5.

Así los costos estimados de inversión inicial del sistema de conducción y distribución del agua residual tratada para riego agrícola fueron de \$638 millones. De acuerdo con la firma COLPOZOS S.A. (2010) el modelo de costos de operación mantenimiento para los sistemas de riego en el Valle del Cauca establece un costo del 5% de la inversión inicial del sistema (\$32 millones).

C3. Costos del sistema de bombeo: Una vez estimado el caudal total del sistema y la carga hidráulica dinámica total, se seleccionó el conjunto bomba-motor de 152,3 HP que cumple con los requerimientos del sistema (Anexo 5.). El costo de inversión inicial es de \$10 millones (COLPOZOS S.A). Los costos asociados al mantenimiento del sistema se determinaron bajo el modelo de costos implementado por COLPOZOS, como un 5% del costo de operación.

### *8.2.3.3 Potencialidad del reuso agrícola con el efluente del sistema de tratamiento propuesto para el municipio de Buga*

Los costos, los beneficios y los indicadores de viabilidad fueron evaluados a 30 años, periodo en el cual se consideran aspectos como vida útil y tiempo de reposición. La Tabla 8-40 cita los costos y beneficios identificados para cada solución y para la Situación Incremental sobre la cual se realizó la evaluación socioeconómica, presenta además cada actor relacionado con la implementación del reuso agrícola.

**Tabla 8-40 Costos y beneficios identificados en la implementación del reuso agrícola.**

Costos		Solución Convencional	Solución Alternativa	Situación Incremental	Actor
C1	Invesrsión inicial del sistema tratamiento de agua residual doméstica	SI	SI	SI (solo la unidad de tratamiento terciario)	Empresa prestadora de servicios públicos
C2	Inversión inicial sistema del transporte y distribución de agua.	NO	SI	SI	Sector agrícola
C3	Inversión inicial estación de bombeo de agua residual tratada.	NO	SI	SI	Sector Agrícola
C4	Costos de O&M del sistema de tratamiento de agua residual doméstica	SI	SI	SI (solo la unidad de	Empresa prestadora de



				tratamiento terciario)	servicios públicos
C5	Costos de O&M del sistema de conducción y distribución de agua para riego	NO	SI	SI	Sector Agrícola
C6	Costos de O&M del sistema de transporte y distribución de agua para riego.	NO	SI	SI	Sector Agrícola
B1	Ahorro por menor uso de fertilizantes	NO	SI	SI	Sector Agrícola
B2	Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental	NO	SI	SI	Empresa prestadora de servicios públicos y municipio.
B3	Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental	NO	SI	SI	Sector agrícola
B4	Ahorro en infraestructura para riego. Pozos profundos de agua subterránea	NO	SI	SI	Sector Agrícola
B5	Aumento de la calidad del cuerpo Hidrico Receptor	NO	SI	Sin estimación financiera	Sociedad en general

#### ✓ Estimación de costos en la *Situación Incremental*

Los costos estimados para la implementación de reuso agrícola fueron discriminados en costos de inversión inicial y costos de operación y mantenimiento considerando los precios de mercado del año 2010. Con base en la Tabla 8-40, los costos asociados a inversión inicial (C1) y operación y mantenimiento del tratamiento propuesto para el municipio de Buga (C5) corresponden a la unidad de tratamiento adicional para reuso agrícola, es decir el la laguna facultativa diseñada con objetivo de reuso agrícola. En este sentido, los costos estimados en la situación incremental se presentan en la Tabla 8-2841, descritos en la caracterización de la *Solución Alternativa*.

**Tabla 8-41 Resumen de costos de implementación reuso agrícola con el efluente del sistema de tratamiento propuesto para el municipio de Buga**

C	Elemento	Costos (millones de pesos)
C1	Inversión inicial de la unidad de tratamiento terciario	2,619
C2	Inversión inicial del sistema de conducción y distribución de agua	638
C3	Inversión inicial de la estación de bombeo de agua residual tratada	10
C4	Costos de O&M de la unidad de tratamiento terciario	130
C5	Costos de O&M del sistema de conducción y distribución de agua para riego	32
C6	Costos de O&M de la estación de bombeo de agua residual tratada	2,5

#### ✓ Estimación de beneficios en la *Situación Incremental*

Dado que el municipio de Buga presenta escenarios de expansión a futuro, la estimación de los beneficios se razonó en función de la tasa de poblamiento del sector. Para ello se adoptó una tasa constante en el periodo de análisis de la evaluación socio económica, considerando un 10% de habitantes cada año sobre una base de población determinada por los planes parciales del municipio. Con base en este escenario se determinó el caudal de agua residual que se producirá en la zona como el 80% del caudal de agua potable como función de la población. La determinación de la proyección de caudal de agua residual permitió estimar los beneficios que se presentan a continuación:

**B1. Ahorro por menor uso de fertilizantes:** Considerando que el área de riego con el efluente del sistema de tratamiento propuesto es de 2.500 ha, las necesidades de fertilizantes estimadas fueron de 408 bultos de UREA/año y 233bultos de NPK/año. Estas necesidades se estimaron con base a la necesidad por hectárea reportada por el (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

Para la estimación de este beneficio se debe contemplar el aporte de carga nutricional de que puede ofrecer el agua efluente en función su concentración de nitrógeno y fósforo. Para este caso específico, se verificó que el agua residual aporta el 100% de las necesidades nutricionales de la caña de azúcar. La cuantificación económica de este beneficio se realizó considerando el costo por bulto de fertilizante (NPK= \$61.650; y UREA= \$67.350) multiplicado por el área de riego potencial (Tabla 8-42).

**Tabla 8-42 Estimación del beneficio “Ahorro por menor uso de fertilizantes” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para el municipio de Buga.**

Item/Año	1	5	10	15	20	25	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	-	259	259	259	259	259	259
Ahorro (Millones de \$)	259	259	259	259	259	259	259

**B2. Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental:** Para calcular este beneficio se emplearon precios de 2010 sobre la base de la estructura instrumento económico de la Tasa Retributiva (TR), que es una estimación del flujo de descarga en el río, las concentraciones de DBO y SST y el tiempo de descarga. Este instrumento se rige por el Decreto 3100 (MAVDT, 2003) que considera un costo asociado a la contaminación puntual de 106,5 \$/kg DBO<sub>5</sub> y 45,5 \$/kg SST. La estimación de beneficio se muestra en la Tabla 8-43 para cada cinco años.

**Tabla 8-43 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de tasa retributiva ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para el municipio de Buga.**

Item/Año	1	5	10	15	20	25	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	-	40,458	41,271	38,402	38,863	39,336	39,525
Ahorro (Millones de \$)	-	40,458	41,271	38,402	38,863	39,336	39,525

**B3 Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental:** La estimación de este beneficio se realizó con precios de 2010, basada en la estructura del instrumento económico Tasa por Uso del Agua (TUA), la cual depende del volumen extraído para riego y del costo establecido por m<sup>3</sup> de agua subterránea, que corresponde a 1,26 \$/m<sup>3</sup> (CVC 2009). La Tabla 8-31 8-44 presenta la estimación realizada para las soluciones consideradas.

**Tabla 8-44 Estimación del beneficio “Reducción en el pago de la tasa por uso de agua ante la autoridad ambiental” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para el municipio de Buga.**

Item/Año	1	5	10	15	20	25	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	-	2,287	2,326	2,353	2,375	2,398	2,407
Ahorro (Millones de \$)	-	2,287	2,326	2,353	2,375	2,398	2,407

B4 Ahorro en infraestructura para riego. Pozos profundos de agua subterránea: De acuerdo con los resultados obtenidos, el caudal de riego estimado para la zona es de 336 L/s, de acuerdo con las características hidrogeológicas de la zona para la extracción de este caudal es necesaria la construcción de 4 pozos con profundidad de 150 m, con un caudal de bombeo de 80 L/s y un costo unitario de \$300 millones (COLPOZOS, 2010). El valor total de la inversión en la construcción fue distribuida en el horizonte del proyecto, debido al escenario de población considerado para esta investigación. Así mismo se consideró como un beneficio asociado a la implementación del reuso agrícola el costo evitado por la no operación y mantenimiento de los pozos de profundos. Así, teniendo en cuenta que la potencia requerida para cada pozo descrito es de 75HP con un tiempo de operación de 18 h y un costo de \$300 Kw-h. Adicional a esto, de acuerdo con el modelo de costos de mantenimiento utilizado por la (COLPOZOS 2010a), el 5% del costo de operación es asumido como un costo de mantenimiento (Tabla 8-45).

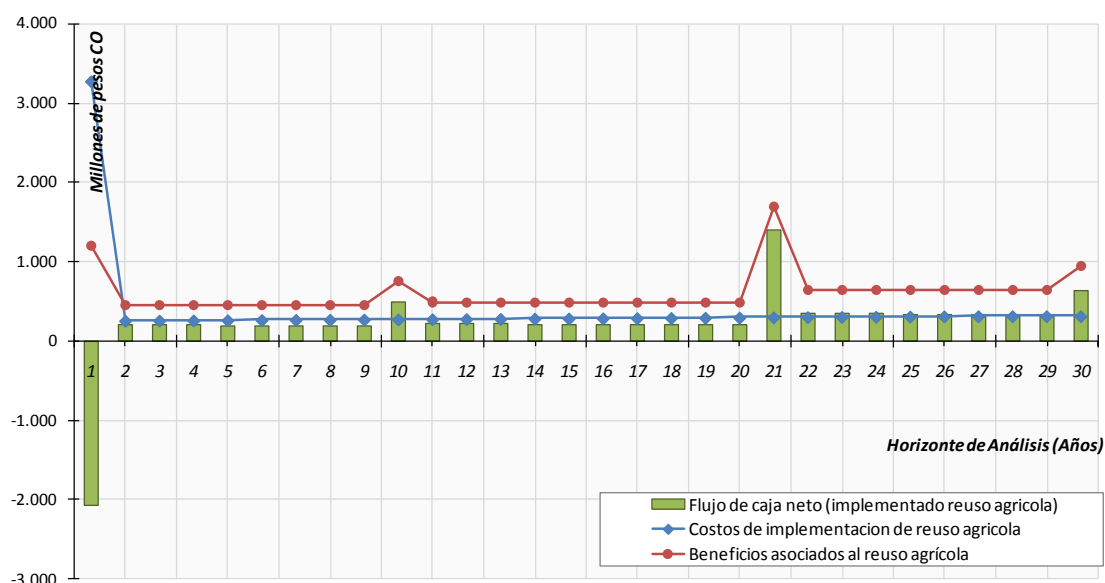
**Tabla 8-45 Estimación del beneficio “Ahorro en infraestructura para riego” al implementar el reuso agrícola con el efluente del tratamiento propuesto para el municipio de Buga.**

Item/Año	1	5	10	15	20	25	30
Solución Convencional (Millones de \$)	-	-	-	-	-	-	-
Solución Alternativa (Millones de \$)	1.200	152	452	190	190	342	642
Ahorro (Millones de \$)	1.200	152	452	190	190	342	642

#### ✓ Estimación de indicadores de viabilidad

Estimados los costos y beneficios de implementar el reuso agrícola como una estrategia para el control de la contaminación, se valoraron los criterios de viabilidad, eficiencia económica y la relación beneficio/costo (Brent 2006). El periodo de análisis considerado fue de 30 años, periodo que tuvo en cuenta los tiempos de vida útil y tiempos de reposición de los diferentes componentes presentados en la *Situación Incremental*. Dado el nivel de la investigación se resalta que los costos y beneficios estimados se consideran preliminares y se deberán adelantar prediseños y estimativos más detallados en cuanto se profundice en la línea de investigación.

El indicador de eficiencia económica presentó un valor (\$29 millones), que significa que los costos de implementar el reuso agrícola en la área periurbana de municipio de Buga son menores que los beneficios a lo largo de todo el horizonte de análisis. Para visualizar este indicador en escala temporal se realizó la Figura 8-26, donde se observa que los costos de implementación de la *Solución Alternativa* formulada son máximos en el año 1 debido a la inversión inicial de la construcción de los sistemas de tratamiento terciario y el sistema de conducción y distribución de agua para riego. Apartir del año 2 los costos de implementar reuso agrícola son constantes debido a que solo obedece al comportamiento en operación y mantenimiento de los sistemas implementados en la Solución Alternativa.



**Figura 8-26 Análisis temporal de costos y beneficios en la Situación Incremental.**

En cuanto al comportamiento de los beneficios de implementar el reuso agrícola se observan que estos apartir del año 2 superan los costos de implementación. Los beneficios relacionados presentan un ascenso en el año 10 debido al ahorro en infraestructura para riego (pozos profundos) al igual que en el año 21, donde de no implementarse el reuso agrícola se debería invertir en este año la reposición de 4 pozos con valor (en costos de 2010) de \$1.200 millones.

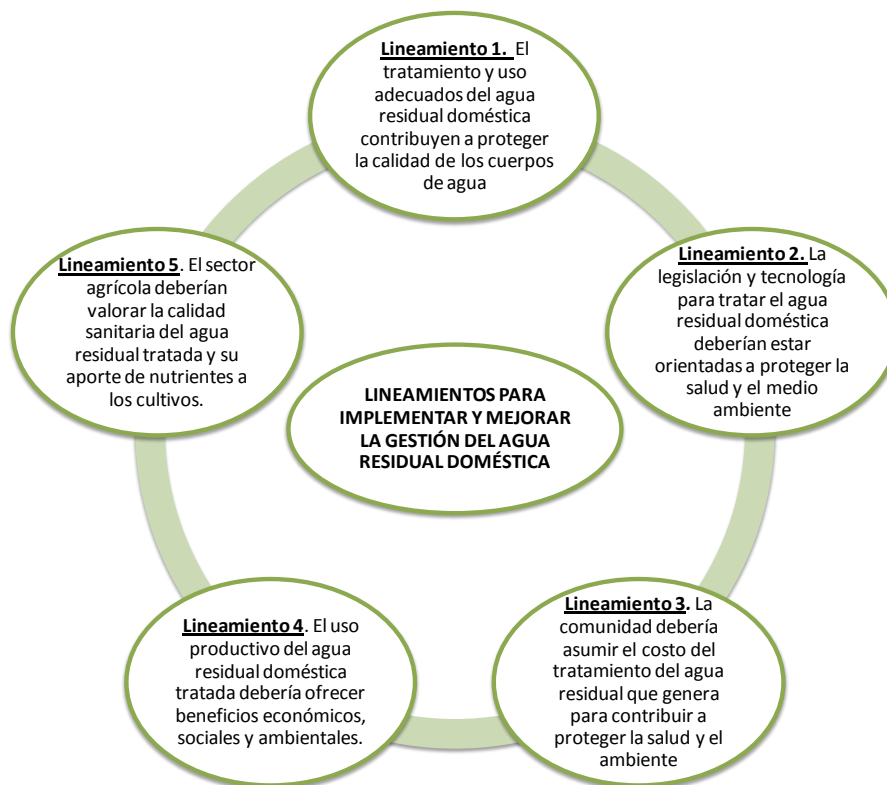
En cuanto al indicador relación beneficio-costos, éste presentó un valor de igual a 1 (Tabla 8-3447) que en términos socioeconómicos se comporta indiferente ante la decisión de implementar el reuso agrícola bajo los factores evaluados en esta investigación. Sin embargo, para completar la evaluación será necesario realizar un perfeccionamiento de los precios de mercado con los cuales se realizaron todas las estimaciones de costos.

**Tabla 8-46 Indicadores de viabilidad socioeconómica de la implementación de reuso agrícola con el efluente de la planta de tratamiento de Cañaveralejo**

Inidcadores de viabilidad socioeconómica	Valor
VPN de los costos incrementales (millones de pesos)	5,043
VPN de los beneficios (millones de pesos)	5,073
Flujo de caja $VPN_{Beneficios} - VPN_{Costos}$ (millones de pesos)	29, 920
Relacion Costo / beneficio (adimensional)	1,01

### 8.3 Propuesta para la implementación del reuso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación en el Valle geográfico del río Cauca.

Como base fundamental para la formulación de la propuesta de implementación del reuso de agua residual doméstica en la agricultura de la región, se consideraron 5 lineamientos para el mejoramiento de la gestión del recurso hídrico, estos permitirán desarrollar una gestión sostenible de recurso, garantizando la disminución de los riesgos asociados a la salud, la estabilidad financiera de los sistemas integrados propuestos y el fundamento jurídico que soporta la implementación de esta práctica (Figura 8-27). Estos lineamientos están basados en la propuesta realizada en el proyecto de sistemas integrados de tratamiento y uso de las aguas residuales en América Latina (CEPIS/OPS *et al.*, 2002).



**Figura 8-27 Lineamientos para mejorar la gestión del agua residual doméstica**

La formulación de esta propuesta se enfocó en los ejes centrales del proceso de mejoramiento continuo, que constan en la creación de los objetivos de implementación, las acciones para lograrlos y los actores involucrados en proceso (ILPES, *et al.*, 2009). Cada lineamiento se presenta con estos componentes y se describen las propuestas locales de articulación de instrumentos de política hídrica que puede contribuir a mejorar la gestión del recurso hídrico (Tabla 8-47). Adicional a estos lineamientos se generaron 4 estrategias de implementación del reuso agrícola en los instrumentos de política hídrica colombiana, una propuesta de incorporación de la valoración del agua residual como recurso económico, y una propuesta organizacional de los usuarios del agua residual tratada para agricultura. Estas estrategias se describe a continuación.

**Tabla 8-47 Marco general de la propuesta de mejoramiento de la gestión del agua residual doméstica tratada.**

Lineamiento General	Justificación	Objetivo General	Acciones específicas para alcanzar el objetivo
L1. Lineamiento 1. El tratamiento y uso adecuados del agua residual doméstica contribuyen a proteger la calidad de los cuerpos de agua	J.1.1 Cifras de tratamiento del agua residual en Colombia y en el Valle del Cauca	O.1.1.1. Articular el tratamiento y uso del agua residual en los instrumentos de política hídrica de estado	A.1.1.1.1. Incorporar el agua residual como parte de la oferta hídrica en las diferentes actividades productivas como la agricultura.
	J.1.2. Cifras de riego con agua residual cruda en el Valle del Cauca		A.1.1.1.2. Orientar la gestión del agua residual en el espacio urbano-rural a la generación y el uso del agua residual como parte de una gestión más eficiente de los recursos hídricos.
	J.1.3. Los conflictos por el agua debidos al incremento en la demanda y a la disminución de la oferta y calidad de este recurso, crecer en la región en forma dramática especialmente en las zonas con poca pluviosidad		A.1.1.1.3. Incorporar el uso de agua residual doméstica tratada en las políticas de estado y promover iniciativas de los diferentes agentes económicos y sociales.
L2. Lineamiento 2. La legislación y tecnología para tratar el agua residual doméstica deberían estar orientadas a proteger la salud y el medio ambiente	J.2.1 Desde 1989 existen directrices de la Organización Mundial de la Salud que establecen los límites de los organismos patógenos presentes en el agua residual doméstica (huevos de nemátodos y coliformes fecales) cuando se usa para el riego agrícola. Sin embargo la mayoría de países en América Latina no han adoptado totalmente estas directrices en su legislación.	O.2.2.1 Implementar tecnología de tratamiento de agua residual doméstica bajo los lineamientos de remoción de agentes patógenos establecidos por la OMS y la FAO.	A.1.1.1.4. Definir y crear competencias claras e instituciones orientas unicamente al manejo del agua residual doméstica.
	J.2.2. En el contexto latinoamericano se han implementado plantas de tratamiento de agua residual doméstica, sin considerar los lineamientos establecidos por la OMS y la FAO a lo que se agregan costos de tratamiento no sostenibles.		A.1.1.1.5. Comprometer mediante instrumentos legales, al sector industrial para tratar sus efluentes para sus descarga o uso posterior.
			A.1.1.1.6. Disponer el agua residual doméstica en función de los estándares de calidad del cuerpo hídrico receptor, tipo de suelo o uso posterior como la agricultura.
			A2.1.1.1. Considerar las directrices de la OMS y la FAO en el marco regulador nacional para establecer límites, mecanismos de control e incentivos, para promover el uso seguro y productivo del agua residual tratada.
			A.2.1.1.2 Establecer lineamientos para incorporar tecnología para remover organismos patógenos humanos y otros contaminantes del agua residual doméstica con el fin de alcanzar la calidad requerida para su uso posterior o disposición final seguros.
			A.2.1.1.3. Garantizar la calidad del agua de reuso agrícola, mediante los instrumentos de concesionamiento, que contribuya a la salud de los agricultores y consumidores.
			A.2.1.1.4. Manejar adecuadamente los subproductos en el proceso de tratamiento de agua residual doméstica, para minimizar los impactos negativos significativos.

**Continuación Tabla 8-48.**

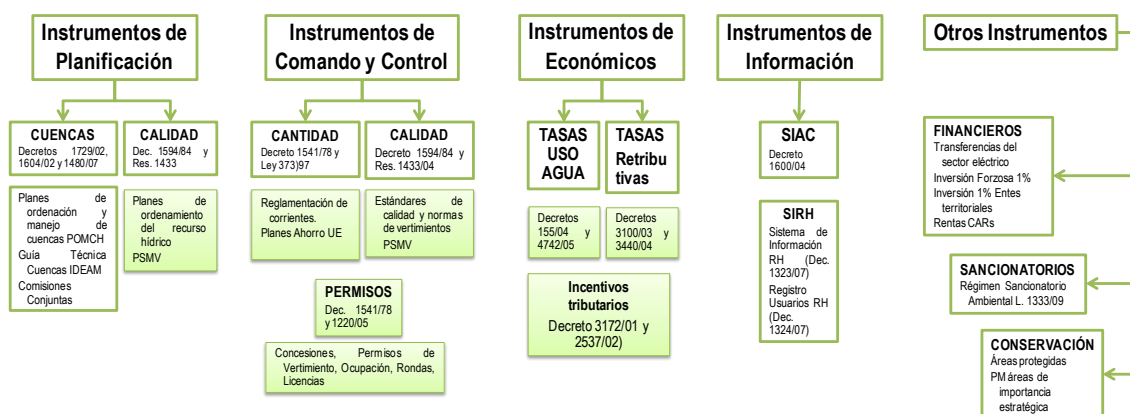
Lineamiento General	Justificación	Objetivo General	Acciones específicas para alcanzar el objetivo
L3. Lineamiento 3. La comunidad debería asumir el costo del tratamiento del agua residual que genera para contribuir a proteger la salud y el ambiente	J.3.1. El agua residual recolectada por las redes de alcantarillado es vertida sin tratamiento adecuado en los cuerpos de agua, deseminando enfermedades cuando estos cuerpos son usados para el consumo humano, el riego o actividades recreativas.	O.3.1.1. Sensibilizar a los diferentes actores de la importancia en los costos de aplicación de sistemas de tratamiento sostenibles y adecuados en el contexto local.	A.3.1.1.1. Sensibilizar a la sociedad acerca de los riesgos a la salud que origina el vertimiento de agua residual doméstica sin tratamiento adecuado y su uso el riego de los productos agrícola que consume.
	J.3.2. La baja cobertura de tratamiento de agua residual doméstica se debe a la falta de prioridad en las inversiones en este rubro. Se suma que la mayoría de plantas de tratamiento no son eficientes para remover patógenos debido que las normas locales no se enfocan en los objetivos de calidad de la fuente hídrica receptora sino a la eficiencias de remoción de DBO y SST.		A.3.1.1.2. Sensibilizar a la sociedad respecto al papel que juega en los costos de construcción y operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento. A.3.1.1.3. Involucrar análisis de costo-eficiencia y costo-beneficio para la realización de los sistemas de tratamiento de agua residual, estos análisis debe garantizar la capacidad de pago de la sociedad lo cual contribuye a la sostenibilidad del servicio A.3.1.1.4. Incorporar los costos de tratamiento de agua residual doméstica en las tarifas de servicios públicos.
L4. Lineamiento 4. El uso productivo del agua residual doméstica tratada debería ofrecer beneficios económicos, sociales y ambientales.	J.4.1. El mayor potencial de integrar el tratamiento de agua residual al uso agrícola radica en reducir las inversiones y costos operativos en ambas actividades.	O.4.1.1. Incorporar el usos de agua residual doméstica tratada a la agricultura de la región, considerando los beneficios económicos que esta trae consigo	A.4.1.1.1. Usar el agua residual doméstica tratada en las actividades agrícolas de la región
	J.4.2. La alternativa de utilizar el agua residual tratada en la agricultura genera un espacio de concertación entre la ciudad, que dispondría de sistemas adecuados de tratamiento, y los agricultores, quienes podrían asumir parte del costo de tratamiento a cambio de la disponibilidad de agua y nutrientes.		A.4.1.1.2. Diseñar planes de pago de acuerdo a la capacidad de quienes generan el agua residual y entre quienes obtienen beneficios por su utilización. A.4.1.1.3. Ubicar los sistemas de tratamiento integrado en áreas con capacidad productiva, para generar beneficios económicos, sociales y ambientales.
L5. Lineamiento 5. El sector agrícola deberían valorar la calidad sanitaria del agua residual tratada y su aporte de nutrientes a los cultivos.	J.5.1. La mayoría de agricultores que usa agua residual doméstica sin tratamiento adecuado para el riego, desconoce el riesgo de contraer enfermedades y transmitirlas a través de los productos contaminados que comercializa.	O.5.1.1. Sensibilizar a los usuarios del agua acerca de los beneficios del agua residual como oferta para el riego agrícola	A.5.1.1.1. Exigir la norma de calidad de agua para riego agrícola.
	J.5.2. La actividad agrícola demanda agua residual doméstica por la necesidad de un abastecimiento regular que compense la escasez o variación de la disponibilidad del agua a lo largo del año.		A.5.1.1.2. Sensibilizar a los usuarios acerca de la disponibilidad constante de este recurso
	J.5.1.3. Los agricultores no valoran el agua residual doméstica como fuente de materia orgánica y nutrientes, aún cuando existen experiencias en la región que han demostrado el valor de este recurso.		A.5.1.1.3. Controlar el uso de fertilizantes químicos una vez se realice el riego con agua residual tratada



### 8.3.1 Articulación de los instrumentos de política hídrica actual en la implementación de reuso agrícola.

En cuanto a la articulación de los instrumentos de política hídrica que regulan el uso y la disposición de agua residual y la normativa de calidad para diferentes usos en el marco normativo colombiano, se identificaron deficiencias en la formulación de estos, que si bien involucran los conceptos de uso eficiente y producción más limpia, no establecen lineamientos claros para la implementación del reuso de agua residual doméstica en los diferentes usos como la agricultura.

En este sentido se formularon 3 estrategias de articulación entre los instrumentos de comando y control asociados al manejo del agua residual doméstica, que son: 1. Los programas de saneamiento y manejo de vertimientos, 2. Los programas de uso eficiente y ahorro del agua y 3. La reglamentación de fuentes hídricas superficiales (Figura 8-28).



**Figura 8-28 Instrumentos de política hídrica Colombiana**  
Fuente: (MAVTD, 2010)

Estrategia 1. Incorporación del reuso agrícola como estrategia para el control de la contaminación hídrica en articulación con el programa de uso eficiente y ahorro del agua.

Estrategia 2. Incorporación del reuso agrícola como estrategia para el control de la contaminación hídrica en articulación con la reglamentación de fuentes hídricas superficiales.

Estrategia 3. Incorporación del reuso agrícola como estrategia para el control de la contaminación hídrica en articulación con el programa de saneamiento y manejo de vertimientos.

Estrategia 4. Incorporación del reuso agrícola como estrategia para el control de la contaminación hídrica en articulación con el concesionamiento de agua para riego.



## 9 CONCLUSIONES

- La identificación de las experiencias de reuso agrícola permitió caracterizar el estado actual del manejo del agua residual en el valle geográfico del río Cauca, donde solo el 7% del caudal es tratado con objetivo de reuso agrícola, tipificando esto como un reuso directo planificado. El 93% restante se tipificó como reuso indirecto no planificado, dado el concesionamiento de este recurso, sin medidas de control de calidad sanitaria para riego, diluido en los cuerpos hídricos receptores.
- La implementación del reuso agrícola con agua residual doméstica como una estrategia para el control de la contaminación de fuentes hídricas, depende de múltiples factores que deben ser evaluados en el contexto local donde se desee implementar esta estrategia. Esto se identificó para tres casos de estudio en el valle geográfico del río Cauca, donde bajo las condiciones técnicas, financieras, climatológicas y socioeconómicas, los tres casos de estudio evaluados presentan diferentes niveles de potencialidad del reuso.
- La metodología de evaluación del potencial de reuso de agua residual doméstica permitió comparar soluciones convencionales del manejo del agua residual doméstica frente a la formulación de soluciones alternativas con implementación de métodos naturales como tecnología de tratamiento. En este tipo de comparaciones se observó que la temporalidad del riego juega un papel predominante para la implementación del reuso agrícola, evidenciado esto en el caso del municipio de Cali, que pese a las grandes inversiones para efectuar el reuso agrícola su potencial de implementación fue del 53%, dada una temporalidad del 100% del tiempo en la práctica de riego. Diferencia contrastada con el caso de estudio de la zona de expansión, donde la práctica del reuso agrícola no se caracterizó de forma positiva, debido en mayor porcentaje a la temporalidad del riego de tan solo 62 días al año (17% del tiempo). En el caso del municipio de Buga los resultados de caracterización del reuso agrícola presentaron un comportamiento indiferente, dado que la temporalidad del riego

presenta un comportamiento típico de bimodalidad en las condiciones de la región y las inversiones de implementación son igualadas por los beneficios.

- De la revisión de los instrumentos de política hídrica colombiana se observó que no se presenta una articulación entre los permisos de vertimientos con el uso posterior del agua residual (con y sin tratamiento) y con el concesionamiento de agua de fuentes hídricas superficiales. La normatividad asociada a la calidad de agua para riego de productos comerciales no se encuentra reglamentada. Además se observó que la práctica de reuso de agua como una estrategia de producción más limpia y uso eficiente aunque se encuentra reglamentada bajo ley nacional, pero no se evidencia reglamentación local alguna, afectando con esto la sostenibilidad del recurso hídrico por la disposición de efluentes, que cumplen con en las eficiencias de remoción de los sistemas de tratamiento implementados, pese a las altas cargas contaminantes vertidas a los cuerpos hídricos.

## 10 RECOMENDACIONES

- A. Es necesaria la realización estudios detallados de fertilización en los casos de estudio evaluados frente al aporte nutricional del agua residual tratada, donde se garantice que el contenido de nutrientes aportado por el agua residual es apto para los suelos, el cultivo y no es necesario la dilución del agua residual implementada para el riego, además de la cuantificación de las pérdidas nutricionales por transporte del agua para riego y movilidad de los nutrientes.
- B. Se deben realizar estudios financieros más detallados que permitan el desglose de las actividades gruesas de estimación de costos, esto con el objetivo de continuar con el análisis socioeconómico y poder perfeccionar los precios de mercado empleados en esta investigación.
- C. Es importante realizar estimaciones de los balances climatológicos a escalas de agregación temporal más detalladas (diaria) evitando con esto sobredimensionamiento del requerimiento hídrico y por consiguiente sobredimensionamiento en los sistemas de conducción y distribución del agua residual tratada.

## 11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbassi, B., y Baz, I. A. (2008). "Integrated Wastewater Management: A Review." En: Efficient Management of Wastewater, I. A. Baz, R. Otterpohl, y C. Wendland, eds., Springer Berlin Heidelberg, 29-40.
- Asano, T. (1991). "Planning and implementation of water reuse projects." *Water science & technology*, 24(9), 1-10.
- Ayers R, y Wescot D. (1987). "La calidad del agua en la agricultura." Estudio FAO riego y drenaje 29.1. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 174.
- Bixio, D., y Wintgens, T. (2006). "Water Reuse System Management Manual AQUAREC. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg." ISBN 92-79-01934-1.
- Blumenthal, U., Mara, D., Peasey, A., Ruiz-Palacios, G., y Stott, R. (2000). "Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines." *Bulletin of the World Health Organization*, 78, 1104-1116.
- Blumenthal, U. J., Mara, D. D., Sleight, P. A., y Carr, R. M. (2007). "Health risks in wastewater irrigation: comparing estimates from quantitative microbial risk analyses and epidemiological studies." 39.
- Brega Filho, D., y Mancuso, P. C. S. (2003). "Conceito de reúso de água." En: Reúso de Água. Capítulo 2, P. C. S. Mancuso y H. F. d. Santos, eds., Universidade de São Paulo - Faculdade de Saúde Pública. ABES, 579.
- Campos, C., Oron, G., Salgot, M., y Gillerman, L. (2000). "Behaviour of the fecal pollution indicators in a soil irrigated with treated wastewater under onsurface and subsurface drip irrigation." *Water science and technology*, 75-79.
- Carr, R. (2005). "Who guidelines for safe wastewater use-more than just numbers." *IRRIGATION AND DRAINAGE-CHICHESTER*-, 54, 103.
- CEPIS. (1995). "Costo/beneficio y costo/efectividad." *Materiales Educativos*, <<http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/eco/003418/03418-14.pdf>>.
- CEPIS/OPS, Moscoso, J., y Egocheaga, L. (2002). "Inventario de la Situación Actual de las Aguas Residuales Domésticas en Colombia." Lima, Perú.
- Cohen, E., y Franco, R. (2003). *Evaluación de proyectos sociales*, 5 Ed., Siglo Veintiuno Editores, México.
- CVC. (1984). "Decreto 1594 de 1984. Mediante el cual se fijan las normas que deben cumplirse para realizar los vertimientos líquidos a cuerpos de agua."
- CVC. (2010). "Bases de datos de usuarios del recurso hídrico en el Valle del Cauca." Cali.
- da Silva, W. (2003). "Sistemas de reúso de água. Projetos e estudo de casos. Reúso de água para fins agrícolas em Populina." En: Reúso de Água. Capítulo 14, P. C. S. Mancuso y H. F. d. Santos, eds., Universidade de São Paulo - Faculdade de Saúde Pública. ABES, 529.
- EPA. (2000). "Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial."
- FAO. (1999). "Wastewater treatment and use in agriculture. ." <Wastewater treatment and use in agriculture. > (30 de Abril, 2010).
- Filho, H. (2003). "Sistemas de reúso de água. Projetos e estudo de casos. Estacao experimental Jessu Netto." En: Reúso de Água. Capítulo 14, P. C. S. Mancuso y H. F. d. Santos, eds., Universidade de São Paulo - Faculdade de Saúde Pública. ABES, 480.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'ELIA, M., y París, M. (2003). *Protección de la calidad del agua subterránea*, Banco Mundial.
- Galvis, A., Cardona, D., y Aponte, A. (2007). "Technology selection for pollution control and wastewater impact reduction in Buga, Colombia." In: SWITCH Scientific Meeting.
- Galvis, A., y Vargas, V. (1998). "Modelo de Selección de Tecnología en el Tratamiento de Agua para Consumo Humano."
- Gijzen, H. (2000). "Low Cost Wastewater Treatment and Potentials for Re-use." Delft, The Netherlands.
- Helmer, R., y Hespanhol, I. (1999). "Políticas y Principios." En: *Control de la contaminación del agua*, CEPIS OPS/OMS, ed., Lima, Perú, 1-9.
- Hespanhol, I. (2003). "Potencial de reúso de água no Brasil." En: Reúso de água. Capítulo 3, P. C. S. Mancuso y H. F. d. Santos, eds., Universidade de São Paulo Faculdade de Saúde Pública. ABES.
- Kadlec, R. H., y Knight, R. L. (1996). *Treatment Wetlands*, McGraw Hill.
- Kamizoulis, G. (2008). "Setting health based targets for water reuse (in agriculture)." *Desalination*, 218(1-3), 154-163.
- Kramer, A., y Mara, D. (2007). "The 2006 WHO Guidelines for Wastewater and Greywater Use in Agriculture: A Practical Interpretation." Springer, 1-17.

- Lavrador Filho, J. (1987). "Contribuição para o entendimento do reuso planejado da água e algumas considerações sobre suas possibilidades no Brasil."
- Lorenzo, E., Ocaña, J., Fernández, L., y Venta, M. (2009). "Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica." *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 40(1).
- Madera, C. (2003). "Microbiological and agronomic effluent quality from duckweed and stabilization ponds, Ginebra, Colombia." In: Institute for water education the Netherlands, UNESCO-IHE.
- Madera, C. A., Peña, M. R., y Van Ginneken, M. (2003a). "Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales." *Ingeniería y competitividad*, 5, 27-35.
- Madera, C. A., Silva, J. P., y Peña, M. R. (2003b). "Sistemas combinados de tratamiento de agua residuales basados en tanque séptico – filtro anaerobio – humedales: una alternativa sostenible en pequeñas comunidades en países tropicales." In: AGUA 2003-Seminario internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales, Cartagena, Colombia.
- Manga, J., Logreira, N., y Serrait, J. (2001). "Reuso de aguas residuales: Un recurso hídrico disponible." *Barranquilla, Colombia*, 12–21.
- Mara, D., y Bos, R. (2007). "Risk Analysis and Epidemiology: The 2006 WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater in Agriculture." *Earthscan/James & James*, 51.
- Mara, D. D. (1987). "Waste Stabilization Ponds: Problems and controversies." *Water Quality International*, 1, 20-22.
- Mara, D. D. (2003). "Domestic wastewater treatment in developing countries."
- Mara, D. D. (2006). "Constructed Wetlands are not a Viable Alternative or Addition to Waste Stabilization Ponds,." In: 7th IWA Specialist conference on waste stabilization ponds, Bangkok, Thailand.
- Mara, D. D., y Johnson, M. L. (2007). "Waste stabilization ponds and rock filters: solutions for small communities." *Water Science and Technology*, 55(7), 103–107.
- Mara, D. D., Pearson, H. W., Oragui, J. I., Arridge, A., y Silva, S. A. (2001). "Development of a new approach to waste stabilization pond design." *Tropical public health engineering research monograph*, 12.
- MAVDT. (1997a). "Guía Técnica para el Desarrollo de Reuso de Aguas Residuales."
- MAVDT. (1997b). "Ley 373. Uso eficiente y ahorro del agua." Bogotá.
- MAVDT. (1997c). "Política Nacional de Producción más Limpia."
- MAVDT. (2004). "Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia."
- Medeiros, S., A. Soares, P. Ferreira, J. Neves, A. de Matos y J. de Souza. . (2005). "Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: estudo das alterações químicas do solo." *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9(4), 603-612.
- Metcalf, y Eddy. (1995a). *Ingeniería de aguas residuales*, McGraw Hill Ed., España.
- Metcalf, y Eddy, I. (1995b). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*, Barcelona, Spain.
- Metcalf y Eddy. (2003). *Waste engineering: Treatment and reuse*, Nueva York.
- Ministerio de salud. (1984). "Usos del agua y residuos líquidos."
- Moscoso, J. (1993). "Reuso de aguas residuales en Perú ", Morelos, México.
- Moscoso, J., Egocheaga, L., Ugaz, R., y Tréllez, E. (2002). "Guía para la formulación de proyectos de Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales Domésticas."
- Moscoso, J., León Suemastu, G., y Gil, E. (1992). "Reuso en acuicultura de las aguas residuales tratadas en las lagunas de estabilización de San Juan. Sección II: Tratamiento de las aguas residuales y aspectos sanitarios." CEPIS-Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. OPS-Organização Pan-Americana de Saúde, Lima, Peru, 70.
- Moscoso, J., y Young, L. E. (2002). "Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: realidad y potencial." 360,589.
- Oakley, S. (2005). "Lagunas de Estabilizacion en Honduras. Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y sostenibilidad." FHIS/USAID/RRAS-CA. Junio 2005: 212. <http://www.rrasca.org/pdf/laguna.pdf>.
- Peña, M. R. (2002). "Advanced primary treatment of domestic wastewater in tropical countries development of high-rate anaerobic ponds," University of Leeds, Leeds.
- Peña, M. R. (2008). "Informe técnico final – Proyecto “Modelación de los mecanismos involucrados en la transformación y remoción de nutrientes y materia orgánica en humedales subsuperficiales para el tratamiento de aguas residuales domesticas.” Programa Nacional de Biotecnología, COLCIENCIAS, Bogotá, Colombia.

- Peña, M. R., y Mara, D. (2004). "Waste Stabilisation Ponds." ICR International Water and Sanitation Centre, The Netherlands.
- Post, J. (2006). "Wastewater treatment and reuse in the esatern Mediterranean region." *Water*, 21, 36-41.
- Reed et al. (1995). *Natural system for water management and treatment*, Second edition Ed., McGraw-Hill.
- Restrepo, I. (1998). "Concepto de sostenibilidad." Cali, Colombia.
- Romero, J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principio de diseño*, Tercera Ed., Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- Romero Rojas, J. A. (2005). *Lagunas de estabilización de aguas residuales*, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- Ruíz, S. A., y Gentes, I. G. (2008). "Retos y perspectivas de la gobernanza del agua y gestión integral de recursos hídricos en Bolivia." 41-59.
- Sanhueza, G. (2007). "Análisis costo eficiencia y costo efectividad." <dgpp.usach.googlepages.com/Costoeficienciayefectividad.pdf>.
- Siebel, M., y Gijzen, H. (2002). "Application of cleaner production concepts in urban water management." In: Conferencia internacional Usos múltiples del agua: Para la vida y el desarrollo sostenible, Univerisidad del Valle. Instituto CINARA 9-10.
- Silva, J. (2008). "Reuso del efluente de la planta de tratamiento de agua residuales de Cañaveralejo PTAR-C en el riego de Caña de azúcar," Tesis de maestría, Universidad del Valle, Cali.
- Silva, J., Torres, P., y Madera, C. (2008). "Domestic wastewater reuse in agriculture. A review." *Agronomía Colombiana*, 26, 347-359.
- Sokolov, A., y Chapman, T. (1981). "Métodos de cálculo del balance hídrico." Guía internacional de métodos de investigación (versión en Español). Instituto de Hidrología de España-UNESCO.
- Suarez, B., Paola, D., Zea, C., y Amparo, D. (2003). "Selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales: una metodología con énfasis en aspectos tecnológico."
- Universidad del Valle. (2010). "Conceptual Framework for the Decontamination and Recuperation of Water Resources in the Municipality of Cali, "Master Plan". Universidad del Valle, UNESCO - IHE, Cali, Colombia.
- Valencia, E. (1998). "Potencialidad del reuso del efluente de una laguna facultativa en irrigación, comparación de la producción utilizando dos hortalizas regadas con efluente y agua subterránea," Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Vanegas, M. (2002). "Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: Realidad y potencial. Estudio complementario del caso de Ibagué-Colombia."
- Weinstein, S. (1986). "Cost-Effectiveness Analysis in Mental Health." *Canadian Journal of Community Mental Health (Revue canadienne de santé mentale communautaire)*, 5(1), 77-88.
- Westerhoff, G. P. (1984). "Un update of research needs for water reuse." 1731-1742.
- WHO. (2006). "Guidelines for the Safe Use of Wastewater. Excreta and Greywater in Agriculture. ." 2006, ed., Francia.
- World Health Organization. (2006). "Guidelines for the Safe Use of Wastewater. Excreta and Greywater in Agriculture. ." 2006, ed., Francia.
- Zeng, G., Jiang, R., Huang, G., Xu, M., y Li, J. (2007). "Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis." *Journal of Environmental Management*, 82(2), 250-259.

## 12 ANEXOS

### Anexo 1. Estructura de la base de datos diseñada para la recopilación de experiencias de reuso de agua residual doméstica en agricultura de la zona de estudio.

Caracterización general	Atributo	Descripción	Tipo de variable	Longitud de la variable
Datos generales del municipio	ID	Identificador del punto de vertimiento	Entera	2
	Municipio	Nombre del municipio que genera el agua residual doméstica	String	50
	DAR	Subdivisión de la CVC que realiza el seguimiento ambiental	String	50
	Población	No. de habitantes	Entera	7
Datos generales de la empresa de servicio y localización de la PTAR	ESP	Nombre de la empresa prestadora de servicios públicos	String	50
	PTAR X	Coordenada plana Este de la PTAR	Decimal	10
	PTAR Y	Coordenada plana Norte de la PTAR	Decimal	10
	E DBO	Porcentaje de eficiencia de remoción de DBO de la PTAR	Entera	2
	E SST	Porcentaje de eficiencia de remoción de SST de la PTAR	Entera	2
	E DQO	Porcentaje de eficiencia de remoción de DQO de la PTAR	Entera	2
Punto de muestreo y caracterización de la calidad del agua residual generada por el municipio	PM X	Coordenada plana Este del punto de muestreo del agua residual generada por el municipio	Decimal	10
	PM Y	Coordenada plana Norte del punto de muestreo del agua residual generada por el municipio	Decimal	10
	Receptor	Nombre del cuerpo hídrico receptor del vertimiento	String	50
	DBO VERT	Concentración de DBO en mg/l del vertimiento	Decimal	6
	SST VERT	Concentración de SST en mg/l del vertimiento	Decimal	6
	Ph VERT	Unidades de Ph del vertimiento	Decimal	6
	CONDUC VERT	Conductividad Hidráulica del vertimiento	Decimal	6
	T VERT	Temperatura en grados centígrados del vertimiento	Decimal	6
	COLI VERT	Concentración de Coliformes totales en del vertimiento	Decimal	6
	DQO VERT	Concentración de DQO en mg/l del vertimiento	Decimal	6
	Q VERT	Caudal en L/s del vertimiento	Decimal	6
Caracterización de la calidad de la fuente receptora antes del vertimiento de agua residual del municipio	DBO 1	Concentración de DBO en mg/l de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	SST 1	Concentración de SST en mg/l de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	Ph 1	Unidades de Ph de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	CONDUC 1	Conductividad hidráulica de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	T 1	Temperatura en grados	Decimal	6

		centígrados de la fuente receptora antes del vertimiento		
	COLI 1	Concentración de Coliformes totales en de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	DQO 1	Concentración de DQO en mg/l de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	OD 1	Concentración de OD en mg/l de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	Q 1	Caudal en L/s de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
Caracterización de la calidad de la fuente receptora después del vertimiento de agua residual del municipio	DBO 2	Concentración de DBO en mg/l de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	SST 2	Concentración de SST en mg/l de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	Ph 2	Unidades de Ph de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	CONDUC 2	Conductividad Hidráulica de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	T 2	Temperatura en grados centígrados de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	COLI 2	Concentración de Coliformes totales en de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	DQO 2	Concentración de DQO en mg/l de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	Q 2	Caudal en L/s de la fuente receptora antes del vertimiento	Decimal	6
	X DESC	Coordenada plana Este del punto de vertimiento de agua residual a la fuente hídrica	Decimal	14
	Y DESC	Coordenada plana Norte del punto de vertimiento de agua residual a la fuente hídrica	Decimal	14
	Reusa	Define si el municipio reusa el agua directamente y puede tomar los valores SI o NO	String	2
	Tipo de resuo 1	Se clasifica la experiencia de resuo de acuerdo con Brega Filho y Mancuso (2003). Puede tomar los valores de agrícola, doméstico, no potable, industrial, recreativo, acuífero, urbano o piscicultura	String	12
	Tipo de resuo 2	Se clasifica la experiencia de resuo de acuerdo con Lavrador Filho (1987). Puede tomar los valores RINP, RIP o RDP	String	4



**Anexo 2 Formato de encuesta con el sector agroindustrial para la validación de las experiencias de reuso de agua residual doméstica.**



*Proyecto de investigación: Potencial de reuso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación por aguas residual en el valle geográfico del río Cauca*

**Encuesta: Manejo del agua residual en el sector agroindustrial de la caña de azúcar**

**1. Aspectos generales de la encuesta**

1.1 Nombre empresa \_\_\_\_\_

1.2 Nombre persona que diligencia la encuesta \_\_\_\_\_

1.3 Cargo \_\_\_\_\_

1.4 Fecha de diligenciamiento \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Firma

**2. Sistemas de tratamiento de agua residual**

2.1 No de puntos de vertimiento autorizados por la CVC \_\_\_\_\_ Cuantos Domésticos? \_\_\_\_\_ Cuantos Industriales? \_\_\_\_\_

2.2 Para cada uno de los vertimientos industriales relacionar

Tecnología de tratamiento	Fuente Descarga	Q afluente	Q efluente	Coord. X	Coord. Y
a					
b					
c					
d					
e					
f					

**3. Acerca de la práctica de reuso para agricultura**

3.1 Conoce cuales son los beneficios de implementar el reuso de agua residual en la agricultura? Si su respuesta es afirmativa, cuales son los beneficios?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3.2 Le interesa conocer los beneficios de implementar el reuso de agua residual en la agricultura? Si su respuesta es NO, por qué?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3.3 Practican el reuso de agua residual?

SI

NO

Si su respuesta fue afirmativa conteste las preguntas 3.4 y 3.5

Si su respuesta fue negativa conteste las preguntas 3.6 y 3.7

3.4 Cual es la procedencia del agua residual que utilizan?

Opción 1: Agua residual generada en el ingenio  
Opción 2: Agua residual de algun municipio o corregimiento cercano  
Opción 3. La combinación de 1 y 2


3.5 Que tipo de reuso practican?

	Agrícola	Caudal (L/S)		Área (ha)		Cultivo	
	Doméstico	Caudal (L/S)					
	Industrial						
			Proceso 1 / Caudal (L/s)				
			Proceso 2 / Caudal (L/s)				
			Proceso 3 / Caudal (L/s)				

3.6 Se contempla la posibilidad de implementar reuso de agua residual en el futuro? Si su respuesta es NO, Por qué?


3.7 Se ha descartado la posibilidad de implementar el reuso de agua residual en el ingenio? Si su respuesta es Si, Por qué?


3.8 Se encuentra el ingenio certificado o en proceso de certificación de la ISO 14000? SI / NO

--

3.9 Conoce la Ley 373 de 1997, acerca del uso eficiente y ahorro del agua? SI/ NO

--

3.10 Ha implementado el ingenio el programa de uso eficiente y ahorro del agua, conforme a la ley 373 de 1997? Si su respuesta es NO, porqué?


3.11 Se incorporó en el programa de uso eficiente y ahorro del agua, el componente de reuso conforme el artículo 5 de la Ley 373

de 1997? Si su respuesta es No, por qué?

---

---

---

---

**Anexo 3 Formato de consulta con expertos para la definición de criterios e indicadores de selección de tecnología de tratamiento de agua residual doméstica.**



**Proyecto de investigación:** Potencial de reuso de agua residual doméstica como estrategia para el control de contaminación por agua residual en el valle geográfico del río Cauca

**Temática:** Definición de criterios e indicadores para la selección de tecnología de tratamiento de agua residual doméstica considerando reuso en agricultura

**CONSULTA CON EXPERTOS**

Primera Parte: Entre los criterios para la selección de tecnología de agua residual considerando reuso agrícola se encuentran aspectos técnicos, ambientales, financieros y socioeconómicos. Con su experiencia y con base en la situación ambiental y socio cultural de la región, marque con un X la opción que considere más conveniente

1,a) Que criterio es mas importante tecnico o ambiental?	R/
	a. Igual importancia
1,b) Que importancia representa el criterio seleccionando frente al otro?	b. Moderada importancia
	c. Fuerte importancia
	d. Demostrada importancia
	e. Extrema importancia
2,a) Que criterio es mas importante tecnico o financiero	R/
	a. Igual importancia
2,b) Que importancia representa el criterio seleccionando frente al otro?	b. Moderada importancia
	c. Fuerte importancia
	d. Demostrada importancia
	e. Extrema importancia
3,a) Que criterio es mas importante tecnico o sociocultural?	R/
	a. Igual importancia
3,b) Que importancia representa el criterio seleccionando frente al otro?	b. Moderada importancia
	c. Fuerte importancia
	d. Demostrada importancia
	e. Extrema importancia
4,a) Que criterio es mas importante ambiental o financiero	R/
	a. Igual importancia
4,b) Que importancia representa el criterio seleccionando frente al otro?	b. Moderada importancia
	c. Fuerte importancia
	d. Demostrada importancia
	e. Extrema importancia
5,a) Que criterio es mas importante ambiental o sociocultural	R/
	a. Igual importancia
5,b) Que importancia representa el criterio seleccionando frente al otro?	b. Moderada importancia
	c. Fuerte importancia
	d. Demostrada importancia

	e. Extrema importancia	_____
6,a) Que criterio es mas importante financiero o sociocultural	R/	_____
	a. Igual importancia	_____
6,b) Que importancia representa el criterio seleccionando frente al otro?	b. Moderada importancia	_____
	c. Fuerte importancia	_____
	d. Demostrada importancia	_____
	e. Extrema importancia	_____

Segunda Parte: A continuación se mencionan algunos indicadores de efectividad para cada uno de los criterios citados en la primera parte. Establezca un porcentaje de importancia de cada indicador. La suma de estos porcentajes debe ser igual a 100%.

#### 1. Criterio Técnico

		Porcentaje %
1.1	Disponibilidad de terreno	_____
1.2	Eficiencias de remoción de parámetros contaminantes	_____
1.3	Requerimientos de energía	_____
	<b>Suma</b>	<b>100%</b>

#### 2. Criterio Ambiental

		Porcentaje %
2.1	Calidad Agronómica del efluente *	_____
2.2	Calidad microbiológica del efluente **	_____
2.3	Producción de lodos	_____
	<b>Suma</b>	<b>100%</b>

\*Basado en la combinación de los diferentes lineamientos (FAO, 1985; EPA, 1954; FAO, 1999; EPA, 1992)

\*\* Basado en las guías OMS (2006)

#### 3. Criterio Financiero

		Porcentaje %
3.1	Inversión inicial	_____
3.2	Operación y mantenimiento	_____
	<b>Suma</b>	<b>100%</b>

#### 4. Criterio Sociocultural

		Porcentaje %
4.1	Facilidad de operación y mantenimiento	_____
4.2	Tenencia de la tierra	_____
	<b>Suma</b>	<b>100%</b>

**Anexo 4 Resultados de la consulta con expertos para la definición de criterios e indicadores de efectividad.**

**PONDERACIÓN DE CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL CON APLICACIÓN DE MÉTODOS NATURALES Y OBJETIVO DE REUSO AGRÍCOLA**

Se aplicó la metodología de Analytic Hierarchy Process (AHP) propuesta por Saaty (Romero, 1997; Zeng *et al.*, 2007). Para conocer la relevancia de los indicadores presentados al contexto de local, se realizaron encuestas a funcionarios de las instituciones relacionadas con el manejo y uso del agua en la ciudad de Cali. Se entrevistaron 15 expertos: 3 de CVC, 4 docentes e investigadores de la Universidad del Valle 3 de EMCALI, 2 Consultores externos, 2 docentes de la Universidad Nacional de México y 1 docente de la Universidad Pontificia Javeriana seccional Bogotá.

Se encuestó sobre las prioridades y preferencias al comparar por parejas, con base en la Tabla A1.1, la importancia de un criterio con respecto a otro para generar una matriz como la presentada en la Tabla A1.2. Para disminuir la posibilidad de distribución de las respuestas se utilizaron solo los criterios definidos con los números 1, 3, 5 y 9.

**Tabla A1.1 Definición y explicación de los niveles de importancia comparativa**

IMPORTANCIA	DEFINICIÓN	EXPLICACIÓN
1	Igualmente importante	Dos factores de decisión que influyen igualmente el factor patrónT
3	Moderadamente mas importante	Un factor de decision moderadamente mas influyente que el otro
5	Fuertemente más importante	Un factor de decisión tiene influencia fuerte sobre el otro
7	Muy fuertemente mas importante	Uno de los factores de decisión tiene una influencia mucho más significativa sobre el otro
9	Extremadamente importante	La diferencia entre las influencias de los dos factores de decisión son extremadamente significativos
2,4,6,8	Valores intermedios	Valores de sentencia entre iguales, moderada, fuerte, muy fuerte, muy fuerte y extremadamente

**Fuente: Saaty, 1997 citado por (Zeng *et al.*, 2007)**

**Tabla A1.2 Matriz de comparación de criterios consultada a actores institucionales**

	AMBIENTAL	ECONÓMICO	TÉCNICO	SOCIAL
Ambiental	1	a	b	d
Económico	1/a	1	c	e
Técnico	1/b	1/c	1	f
Social	1/d	c/e	1/f	1

Para generar la matriz que condensara las comparaciones realizadas por las instituciones se realizó un análisis de frecuencia de las respuestas asignadas a cada par de criterios.

Del proceso de encuestas se compilaron los datos, y se generaron gráficas de frecuencia de las respuestas del centro decisor. Se encontró que el 18.2% de los expertos considera que existe una fuerte importancia del criterio ambiental sobre el criterio técnico (Figura A1.2-a) El 36% del grupo consultado opina que existe una fuerte importancia del criterio técnico frente al económico (Figura A1.2-b). Los criterios técnico y sociocultural presentan igual importancia, determinada por el 45,4% de los expertos consultados (Figura A1.2-c).

Cuando se contrastaron los criterios ambiental y económico, el 63,6% de los expertos considera una fuerte importancia del criterio ambiental respecto al económico (Figura A1.2-d), la comparación realizada entre el criterio ambiental y el sociocultural, los expertos consideran de igual importancia en un 54,5% (Figura A1.2-e). Finalmente el paralelo que presentó los resultados más afines entre expertos, fue la comparación de los criterios económico y sociocultural, que consideraron en un 74,0% que el criterio sociocultural es inverso al económico a la hora de realizar el proceso de selección (Figura A1.2-f).

Con base en el análisis de frecuencia se generó la matriz de comparación de criterios, asignado en cada elemento  $ij$  de la matriz el juicio de valor con mayor frecuencia encontrado (Tabla A1.4). El sistema de pesos preferenciales se obtuvo normalizando los resultados de la matriz de comparación, esta normalización se obtuvo mediante la relación de cada elemento de la matriz y la sumatoria de cada columna correspondiente al elemento. Posteriormente estimando la media aritmética de la matriz normalizada, se obtuvo el peso unitario (W) (Romero, 1997)

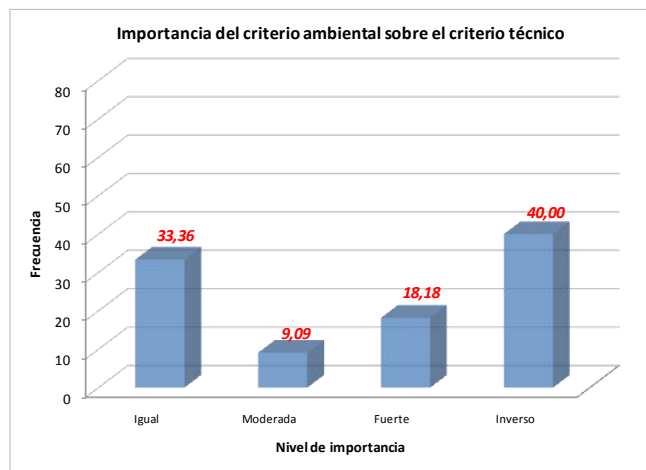
**Tabla A1.3 Matriz de comparación de criterios para la selección de tratamiento de agua con objetivo de reuso agrícola**

CRITERIO	TÉCNICO	AMBIENTAL	ECONÓMICO	SOCIOCULTURAL
Técnico	1,0	0,2	5,0	1,0
Ambiental	5,0	1,0	5,0	1,0
Económico	0,2	0,2	1,0	0,2
Sociocultural	1,0	1,0	5,0	1,0

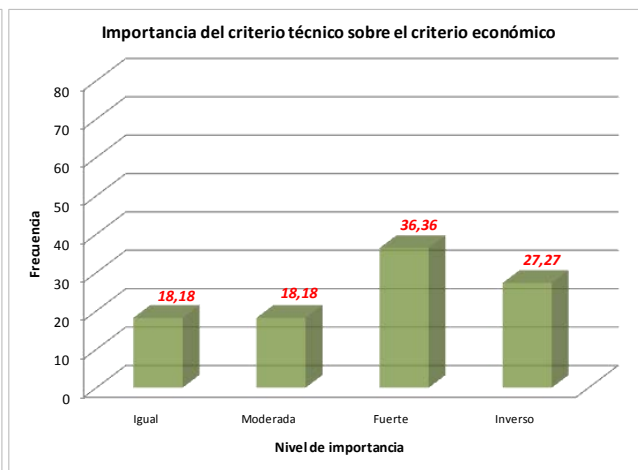
**Tabla A1.4 Calculo de pesos de criterios para la selección de tratamiento de agua con objetivo de reuso**

CRITERIO	TÉCNICO	AMBIENTAL	ECONÓMICO	SOCIOCULTURAL	W
Técnico	0,14	0,08	0,31	0,31	0,21
Ambiental	0,69	0,42	0,31	0,31	0,43
Económico	0,03	0,08	0,06	0,06	0,06
Sociocultural	0,14	0,42	0,31	0,31	0,30

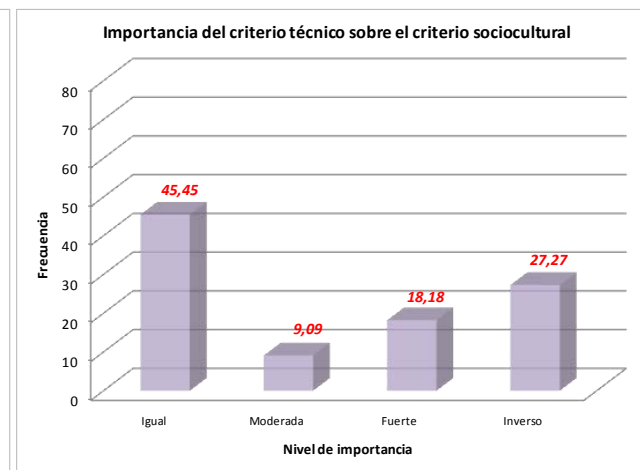
Los resultados obtenidos de la consulta con expertos, arrojaron una importancia relativa del 43,4% del criterio ambiental, seguido del criterio sociocultural (29,5%), criterio técnico (21%) y finalmente el criterio económico (5,9%).



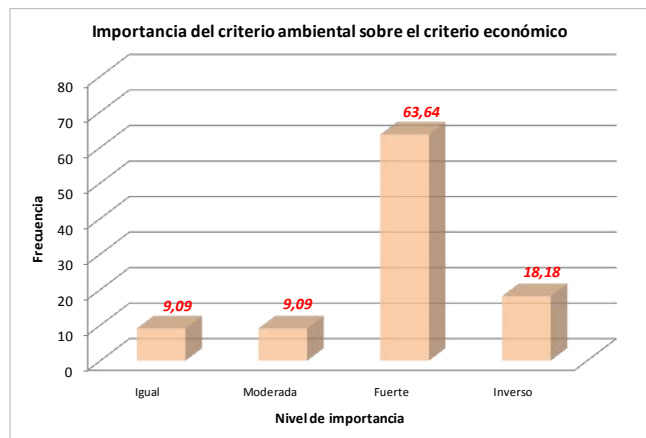
a)



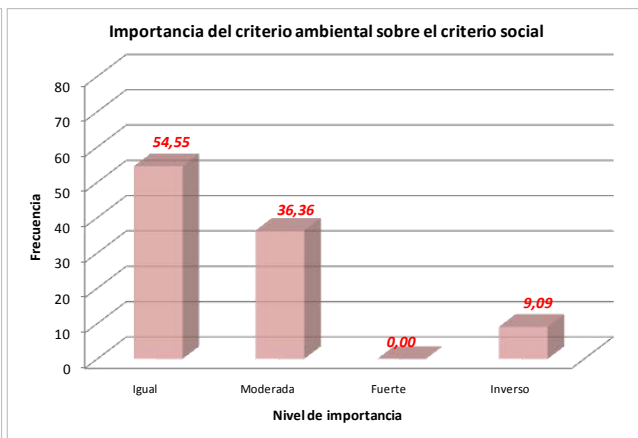
b)



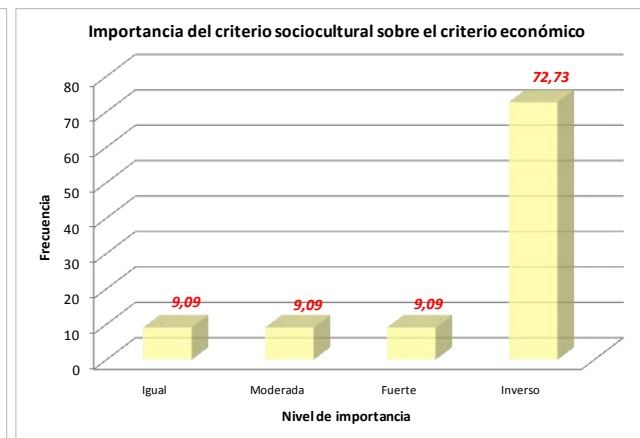
c)



d)



e)



f)

**Figura A1.1 Comparación por pares de criterios para la selección en tecnología de tratamiento de agua residual doméstica con objetivo de reuso agrícola e implementación de métodos naturales**



**Anexo 5 Prediseño de los sistemas de conducción y distribución del agua residual tratada para reuso agrícola.**

**Anexo 6 Presupuesto de los sistemas de tratamiento de agua residual doméstica de los casos de estudio  
Zona de expansión de Cali y Municipio de Buga.**