

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DISCONTINUIDAD  
EN EL SERVICIO DE AGUA POTABLE EN CALI.  
ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD DE LA PLANTA REGIONAL DE BIORREMEDIACIÓN  
DE AGUAS RESIDUALES

CARLOS DAVID HURTADO GARCÍA

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE CIENCIA SOCIALES Y ECONÓMICAS  
PROGRAMA DE ECONOMÍA  
SANTIAGO DE CALI

2014

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DISCONTINUIDAD  
EN EL SERVICIO DE AGUA POTABLE EN CALI.  
ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD DE LA PLANTA REGIONAL DE BIORREMEDIACIÓN  
DE AGUAS RESIDUALES

CARLOS DAVID HURTADO GARCÍA

Trabajo de grado para optar por el título de Economista

Director:

JAIME HUMBERTO ESCOBAR MARTÍNEZ  
Economista

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE CIENCIA SOCIALES Y ECONÓMICAS  
PROGRAMA DE ECONOMÍA  
SANTIAGO DE CALI

2014

Quiero agradecer a las siguientes personas que han contribuido con este trabajo, a quien con sus consejos, su apoyo, su opinión, y que con sus consejos técnicos y pedagógicos me han brindado herramientas para realizar este trabajo, el cual además de ser un estudio de pre-factibilidad es también un insumo para posteriores trabajos que desean impulsar un proyecto que brinda soluciones integrales a un problema que cada vez es más fuerte en nuestra región.

Jaime Humberto Escobar Martínez  
Economista – Tutor del trabajo de grado  
Director de Extensión  
Universidad del Valle - Cali - Colombia

Douglas Laing  
Ing. Agrónomo, Pd.D. The University of Queensland  
Investigador independiente de agricultura tropical y el medio ambiente  
Miembro de la junta-Instituto Cinara  
Universidad del Valle - Cali - Colombia

Andrés Toro  
Ing. Sanitario  
Est. MSc MWI SE Cali  
UNESCO-IHE  
Grupo Saneamiento Ambiental-Instituto Cinara  
Universidad del Valle - Cali - Colombia

Miguel Peña  
Ing. Sanitario. Universidad del Valle  
MSc in Tropical Public Health Engineering. University of Leeds.  
Ph.D de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Leeds.

## RESUMEN

El municipio de Santiago de Cali, y en general la región del Valle del Cauca, enfrenta un grave problema en relación al manejo de agua potable y residual. Puntos críticos de contaminación como el Canal Sur CVC, los sumideros de desechos orgánicos cercanos a los ríos que atraviesan las veredas de Cali, la contaminación excesiva del río Cauca, entre otros factores, son temas que hoy por hoy no son tomados de forma responsable por ningún ente público, los cuales no plantean soluciones tempranas a estos focos de contaminación. A raíz de lo anterior, surge una alternativa de tratamiento de agua residual que plantea una solución integral a todos los problemas mencionados para el municipio de Santiago de Cali y los municipios cercanos, y que puede ser aplicado en otras zonas del país. Es una alternativa a menor costo utilizando procesos naturales diferentes a otras alternativas existentes, como por ejemplo, la realización de la Fase II en la PTAR de Cañaveralejo por parte de EMCALI, la cual soluciona parcialmente los problemas mencionados a un alto costo.

Este trabajo se centra en un estudio de pre-factibilidad del proyecto alternativo con mirada regional, en el cual se realiza una descripción del proyecto, su funcionamiento, una estimación detallada de los costos, la identificación de los beneficios potenciales, una comparación entre la efectividad del proyecto alternativo versus la Fase II de la PTAR, en base a la carga orgánica removida por cada uno de los proyectos y el costo de su implementación. Finalmente, se deja planteado las bases para la realización de un análisis costo-efectividad a partir de datos más precisos, el cómo se debería realizar, que metodología se puede utilizar, y que resultados pueden esperarse. Además de ello, se identifica las limitantes de este proyecto alternativo, sus posibles inconvenientes y soluciones.

Cabe decir que este trabajo ha servido como base y fundamento para impulsar el proyecto en diferentes espacios académicos y públicos, de manera fuerte como fuente argumentativa en relación a los beneficios esperados y la estimación inicial del costo de su implementación.

Palabras clave: Análisis costos-efectividad, beneficios esperados, costos estimados, análisis de pre-factibilidad, servicios públicos.

## CONTENIDO

|                                                                                                         | pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1. INTRODUCCIÓN Y PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA .....                                                       | 1    |
| 1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....                                                                     | 1    |
| 1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....                                                                     | 1    |
| 1.3 HIPÓTESIS .....                                                                                     | 1    |
| 1.4 JUSTIFICACIÓN .....                                                                                 | 2    |
| 1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                                                          | 4    |
| 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....                                                                         | 6    |
| 3. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA.....                                                                       | 15   |
| 4. PERSPECTIVA DE ANÁLISIS DEL PROYECTO .....                                                           | 17   |
| 5. CONJUNTO DE PROYECTOS ALTERNATIVOS.....                                                              | 18   |
| 5.1 SEGUNDA FASE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CAÑAVERALEJO.....                                       | 18   |
| 5.2 PLANTA REGIONAL DE BIORREMEDIACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES – PTARR.....                             | 19   |
| 6. LA SUSPENSIÓN DEL SERVICIO DE AGUA EN SANTIAGO DE CALI .....                                         | 20   |
| 7. LA INTERACCIÓN HIDRÁULICA ENTRE EL CANAL SUR Y EL RIO CAUCA, CLAVE PARA ENTENDER EL PROBLEMA .....   | 21   |
| 8. EL RIO CAÑAVERALEJO Y LA CONTAMINACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....         | 22   |
| 9. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO – HACIA UNA VISIÓN DE LA PLANTA DE BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES..... | 23   |
| 9.1 SEPARACIÓN TEMPRANA DE LAS AGUAS RESIDUALES Y LAS AGUAS LLUVIAS .....                               | 23   |
| 9.2 BENEFICIOS SOCIALES .....                                                                           | 24   |
| 9.3 COSTOS SOCIALES .....                                                                               | 25   |
| 9.4 TRES ETAPAS DE BIORREMEDIACIÓN .....                                                                | 25   |
| 10. PROCEDIMIENTO Y MECANISMOS IMPLEMENTADOS EN EL PROYECTO .....                                       | 26   |
| 10.1 EL PRIMER PASO: TRATAMIENTO PRIMARIO .....                                                         | 26   |
| 10.2 SEGUNDO PASO: LAGUNA FACULTATIVA – TRATAMIENTO PRIMARIO .....                                      | 27   |

|        |                                                                                                        |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 10.3   | TERCER PASO: TRATAMIENTO SECUNDARIO (SAUCES, CAÑA BRAVA, JUNCOS Y BUCHONES) - HUMEDALES.....           | 27 |
| 10.4   | SALINIZACIÓN DE LAS TIERRAS DEL VALLE DEL RIO CAUCA.....                                               | 28 |
| 10.4.1 | La importancia de los Sauces.....                                                                      | 29 |
| 10.4.2 | El tratamiento con Juncos y Buchones.....                                                              | 29 |
| 11.    | ALGUNOS DETALLES DE CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....              | 30 |
| 11.1   | TRANSPORTE DE AGUAS RESIDUALES POR TUBERÍAS .....                                                      | 30 |
| 11.1.1 | ESTIMACIONES PROVISIONALES DE LAS NUEVAS TUBERÍAS REQUERIDAS PARA LAS AGUAS RESIDUALES DE CALI .....   | 31 |
| 12.    | METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE PROYECTO.....                                                             | 32 |
| 12.1   | ANÁLISIS COSTO-EFICIENCIA (ACE) .....                                                                  | 32 |
| 12.2   | COSTOS UNITARIOS DENTRO DEL ACE.....                                                                   | 33 |
| 12.3   | ASPECTOS OPERATIVOS DEL ANÁLISIS COSTO-EFICIENCIA .....                                                | 33 |
| 13.    | EVALUACIÓN DEL PROYECTO – ESTUDIOS DE PRE-FACTIBILIDAD.....                                            | 35 |
| 13.1   | OBJETIVO DE EVALUACIÓN .....                                                                           | 35 |
| 13.2   | ESTRUCTURACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRTAMIENTO DENTRO DEL PROYECTO DE LA PLANTA DE BIORREMEDIACIÓN ..... | 36 |
| 13.2.1 | Especificaciones técnicas.....                                                                         | 36 |
| 13.2.2 | Lagunas anaerobias.....                                                                                | 37 |
| 13.2.3 | Lagunas facultativas.....                                                                              | 38 |
| 13.2.4 | Humedales.....                                                                                         | 38 |
| 13.2.5 | Área total necesaria para la planta .....                                                              | 38 |
| 14.    | ESTIMACIÓN PROVISIONAL DE LOS COSTOS .....                                                             | 39 |
| 14.1   | IDENTIFICACIÓN DE LOS COSTOS PROVISIONALES .....                                                       | 39 |
| 14.2   | COSTOS UNITARIOS – INVERSIÓN .....                                                                     | 39 |
| 14.3   | LAGUNAS ANAERÓBICAS .....                                                                              | 41 |
| 14.4   | LAGUNA FACULTATIVA.....                                                                                | 41 |
| 14.5   | HUMEDALES.....                                                                                         | 42 |
| 14.6   | COSTO DEL TERRENO .....                                                                                | 42 |
| 14.7   | COSTO TOTAL DE LOS COMPONENTES Y TERRENO DE LA PLANTA DE BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....      | 43 |
| 14.8   | COSTOS Y CARACTERISTICAS DE LAS TUBERÍAS.....                                                          | 43 |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 14.9 COSTO TOTAL DEL PROYECTO.....                                                           | 46 |
| 15. CÁLCULO DE EFICIENCIA – PUNTO CLAVE.....                                                 | 46 |
| 16. CRITERIOS DE ESCOGENCIA DE ALTERNATIVAS PLANTEADAS, FRENTE A LA FASE II DE LA PTAR. .... | 47 |
| 17. POTENCIALES BENEFICIARIOS DEL PROYECTO .....                                             | 48 |
| 18. ESTUDIOS POSTERIORES CON DATOS MÁS PRECIOSOS – ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD.....             | 50 |
| 18.1 RPC (RELACIÓN PRECIO CUENTA).....                                                       | 50 |
| 18.2 ÍNDICE COSTO – EFECTIVIDAD Y FLUJOS DE COSTOS .....                                     | 52 |
| 18.3 RESULTADOS OBTENIDOS .....                                                              | 52 |
| 18.4 SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA VIABLE .....                                                | 53 |
| 19. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RIESGOS .....                                                 | 54 |
| 20. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES.....                                        | 55 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                                              | 60 |
| Anexo A (Figuras) .....                                                                      | 63 |
| Anexo B (Tablas).....                                                                        | 75 |
| Anexo C (Hojas de cálculo).....                                                              | 81 |

## LISTA DE FIGURAS

pág.

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. PTAR.....                                                                                                          | 18 |
| Figura 2. Interacción hidráulica con caudal alto. ....                                                                       | 21 |
| Figura 3. Interacción hidráulica con caudal bajo. ....                                                                       | 22 |
| Figura 4. Vista de ubicación de la PTAR y la PTAP .....                                                                      | 63 |
| Figura 5. Recorrido Canal Sur CVC. ....                                                                                      | 63 |
| Figura 6. Ubicación de los lixiviados y Navarra frente al Canal Sur.....                                                     | 64 |
| Figura 7. Salida del Canal CVC al río Cauca .....                                                                            | 64 |
| Figura 8. Contaminación del río cerca a la bocatoma de la planta de Puerto Mallarino.....                                    | 65 |
| Figura 9. Contaminación Canal Sur CVC.....                                                                                   | 65 |
| Figura 10. El efluente de la primera fase de la PTAR .....                                                                   | 66 |
| Figura 11. Mirada Previa a la implementación de tuberías para la transición de aguas residuales en el perímetro urbano ..... | 67 |
| Figura 12. Ubicación de las estaciones de bombeo.....                                                                        | 67 |
| Figura 13. Mecanismo para la implementación de tuberías de transmisión de aguas residuales.....                              | 68 |
| Figura 14. Tipos de flujo.....                                                                                               | 68 |
| Figura 15. Eficiencia de remoción de materia organiza.....                                                                   | 69 |
| Figura 16. Suelo necesarios para la implementación de la PTARR. ....                                                         | 69 |
| Figura 17. Ilustración de la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales. ....                                    | 70 |
| Figura 18. Altura municipios. ....                                                                                           | 70 |
| Figura 19. Alternativa de tratamiento A. ....                                                                                | 71 |
| Figura 20. Alternativa de tratamiento B.....                                                                                 | 71 |
| Figura 21. Diseño técnico de alternativa de tratamiento A. ....                                                              | 72 |
| Figura 22. Diseño técnico de alternativa de tratamiento B. ....                                                              | 72 |
| Figura 23. Diseño laguna anaeróbica de la alternativa A.....                                                                 | 73 |
| Figura 24. Diseño laguna anaeróbica de la alternativa B. ....                                                                | 73 |
| Figura 25. Diseño laguna facultativa la alternativa A y B. ....                                                              | 74 |

## LISTA DE TABLAS

pág.

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Estimaciones provisionales de distancia de las tuberías para el municipio de Santiago de Cali – 41,7 Kilómetros. .... | 31 |
| Tabla 2. Terreno – Hectáreas necesarias.....                                                                                   | 38 |
| Tabla 3. Costos unitarios, material y servicios. ....                                                                          | 40 |
| Tabla 4. Costos totales de la construcción de la planta de Biorremediación. ....                                               | 42 |
| Tabla 5. Costos de la construcción de planta de biorremediación más terreno. ....                                              | 43 |
| Tabla 6. Costos unitarios de la tubería.....                                                                                   | 44 |
| Tabla 7. Instalación tuberías .....                                                                                            | 45 |
| Tabla 8. Costo total de la tubería. ....                                                                                       | 45 |
| Tabla 9. Costo total del proyecto. ....                                                                                        | 46 |
| Tabla 10. Efectividad de remoción de la carga orgánica. ....                                                                   | 47 |
| Tabla 11. Crecimiento geométrico de la población .....                                                                         | 49 |
| Tabla 12. Población estimada por municipio.....                                                                                | 49 |
| Tabla 13. Razón precio cuenta.....                                                                                             | 50 |
| Tabla 14. Índice costo – efectividad TSD 12%.....                                                                              | 52 |
| Tabla 15. Índice costo – efectividad TSD 8,5%.....                                                                             | 53 |
| Tabla 16. Valor de los elementos encontramos en el agua .....                                                                  | 75 |
| Tabla 17. Caudal y carga orgánica para tratar en la alternativa A. ....                                                        | 76 |
| Tabla 18. Caudal y carga orgánica para tratar en la alternativa B. ....                                                        | 76 |
| Tabla 19. Costos generales Lagunas Anaerobias.....                                                                             | 77 |
| Tabla 20. Costos generales Lagunas Facultativa .....                                                                           | 77 |
| Tabla 21. Costos generales Humedales.....                                                                                      | 78 |
| Tabla 22. Costo del terreno.....                                                                                               | 79 |
| Tabla 23. Costos de tuberías sin instalación .....                                                                             | 79 |
| Tabla 24. Eficiencia de alternativas del proyecto .....                                                                        | 80 |
| Tabla 25. Precios cuenta .....                                                                                                 | 80 |
| Tabla 26. Resultados obtenidos de la evaluación del proyecto – Post Factibilidad.....                                          | 81 |



## 1. INTRODUCCIÓN Y PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

Es importante resaltar que la Ciudad de Santiago de Cali, se encuentra afectada por la discontinuidad del servicio de agua de Cali, y el manejo que se le está dando a las aguas residuales. No obstante, la solución no reside sólo en lograr una continuidad del servicio, sino en llevar a cabo un proyecto que promueva o solucione problemas relacionados con la contaminación excesiva del Rio Cauca, y ríos y quebradas aledaños, mal manejo de los aguas residuales de ciertas zonas de la ciudad, y los impactos ambientales que han venido generado los malos manejos de los suelos y zonas influyentes en el caudal de los ríos, que se ven afectadas por los cambios climáticos y las torrenciales lluvias que se han venido presentando en la ciudad. Además de esto, se debe buscar un proyecto integrador de toda la región donde la capital del Valle del Cauca y sus pueblos y ciudades cercanas como lo son Jamundí, Palmira y Rozo, buscando un beneficio para la sociedad regional como objetivo macro; esto lo constituye el proyecto de la Planta de Biorremediación de aguas residuales.

### 1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Factores ambientales como el desprendimiento de tierra sobre la cuenca alta del Rio Cauca derivados de los fenómenos de erosión en las zonas altas de cuencas habitadas, y la mala disposición de vertientes de aguas residuales en el municipio, comprometen la calidad en la prestación del servicio de agua potable en Cali debido a las interrupciones frecuentes del mismo por la inconveniencia del tratamiento utilizado. La solución al problema de discontinuidad que presenta el servicio en ciertos momentos mira distintas alternativas que deben ser evaluadas económica y socialmente.

### 1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la alternativa de solución para garantizar la continuidad y el mejoramiento del servicio de agua y saneamiento, que desde el punto de vista social y ambiental es la más viable para la ciudad?

### 1.3 HIPÓTESIS

La alternativa de proyecto que será evaluada en este trabajo generaría mayores beneficios a la sociedad dado que solucionaría de raíz el problema planteado al garantizar la continuidad del servicio de agua potable y contrarrestar los efectos de impacto ambiental que se han venido

presentando en los últimos años, diferente a otras alternativas propuestas por entidades como EMCALI.

#### 1.4 JUSTIFICACIÓN

A raíz de la dificultad que surge en torno a la continuidad del servicio de agua potable en Cali, es necesario buscar una solución que beneficie a la sociedad del perímetro urbano y rural de la ciudad, buscando no sólo un bienestar con base en un servicio eficiente, sino la reducción y corrección de los problemas ambientales que se han venido presentando a raíz de los malos manejos de los recursos naturales y la deficiente planeación de expansión urbana.

La planta de Puerto Mallarino, es la principal fuente de abastecimiento de agua potable puesta en funcionamiento a principios de los años sesenta cuando la población alcanzaba los 600 mil habitantes. Por estos años está llegando al límite de su capacidad dado que en la actualidad la población alcanza los 2.5 millones. A raíz de ello, se ha tenido que recurrir a la construcción de nuevas plantas de potabilización, dado el rápido crecimiento demográfico y la expansión urbana que acompaña a este fenómeno. Hemos percibido el déficit en el suministro periódico de agua, al igual que la calidad del servicio en donde, si tratamos de identificar las causas de este suceso, podemos decir que estas tienen diversos orígenes.

Como calidad del servicio agua potable podemos entender, a partir de las disposiciones de la CRA (Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico) según el decreto 475 de 1998 establece que el agua suministrada por la persona que presta el servicio público de acueducto deberá ser apta para consumo humano, independientemente de las características del agua cruda y su precedencia. Y según el artículo 4º de este decreto, “Las personas que prestan el servicio público y acueducto, bajo condiciones normales, deberán garantizar su abastecimiento en continuidad y presión de la red de distribución, acorde con lo dispuesto en los planes de gestión y resultados (PGR), elaborados por las personas que prestan el servicio público de acueducto y aprobación por el Ministerio de Desarrollo Económico, de acuerdo a lo estipulado en la Ley 142 de 1994”<sup>1</sup>.

Observando entonces la definición que da la CRA, el actual servicio de agua potable de Cali y su alcantarillado, podemos percibir el no cumplimiento de un eventual servicio de agua potable dado que no se está brindando una continuidad y presión del servicio público. Estos sucesos o problemas se deben a diversos factores ambientales y mala disposición de vertientes, que en conjunto son causa directa de la problemática planteada. En otras palabras, la demanda por el servicio prestado agobia la capacidad instalada y el mal manejo de las fuentes de suministro de agua y su sistema natural de regulación de aguas.

Cuando se presenta la temporada de lluvia, o al presentarse diversos cambios climáticos en la región, concentrados en la cordillera central y occidental, o durante el fenómeno de la niña, la ciudad queda sin agua, dado que la lluvia no está siendo retenida por la vegetación degradada de los

---

<sup>1</sup> Decreto 475 de 1998. Normas técnicas de calidad del agua potable. Marzo 10 de 1998

bosques cercanos. Es decir que el agua está cayendo de manera directa a la tierra, y esta es arrastrada, junto con desperdicios que se encuentra a su paso, al drenaje principal que es el Rio Cauca; además de ello desechos de todo tipo, en especial desechos biológicos del sur dada la expansión del sector sur en la ciudad, caen sobre el canal de aguas de la CVC que posteriormente desemboca en el Rio Cauca, agravando la situación.

Observamos entonces la presencia de colmatación en el rio, es decir, la acumulación de lodos, lo cual conlleva a tener ciertos riesgos. En el caso de los lagos o lagunas, los materiales arrastrados por las corrientes de agua se depositan en los humedales convirtiéndose en barrizales que no son útiles para el consumo humano y animal, además de alterar el ecosistemas. En el caso de los ríos, dichas aguas dejan de ser útiles para pesca y piden atractivo turístico. Al presentarse alguna de estas causas o la combinación de las mismas, las plantas de tratamiento, en particular la planta de Puerto Mallarino, no pueden entrar a potabilizar y tratar esta agua contaminada llena de desechos, dado que no están diseñadas para tratar tanta cantidad de desechos sólidos y lodos (dado que colapsarían las bocatomas y los sistemas de tratamiento), siendo el corte del suministro de agua el efecto inmediato, y aunque se use el embalse que se ha creado en la planta de Puerto Mallarino esta solo brinda por pocas horas el servicio de agua en la ciudad. El  $DBO_5$  es la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua, siendo una medida indicativa del carbono orgánica de rápida asimilación. Cuando se presenta un  $DBO_5$  muy bajo existe un riesgo biológico latente dado que no se presentan grandes procesos de oxidación de la materia orgánica, conllevando a que las aguas presenten altas tasas de contaminación siendo nociva el agua para el consumo, y no se presenta procesos naturales de depuración.

Existen proyectos alternativos que se han mencionado dentro de las posibles soluciones a los problemas del agua potable y aguas residuales de la ciudad de Cali. Los cuales son:

- Traer agua de la Salvajina
- Una represa en la cuenca del rio Cauca
- El cambio en la posición de la bocatoma de PTAP Puerto Mallarino
- Traer agua dese el rio Timba por gravedad
- Una represa y planta en la cuenta del rio Pance
- Construcción de otra PTAP de agua potable antes de 2025
- Construcción de otra PTAR en el sur de Cali
- PTARs nuevas para Palmira, Rozo, Candelaria, Yumbo y Jamundí.
- Construcción de otro reservorio de emergencia para PTAP

Pero dichas alternativa solucionan un pequeña parte de la cantidad de problemas que se presentan en la región, como lo es mantener la continuidad del agua a partir de otros efluentes como ríos y represas, pero dejan de lado la contaminación que se produce y la degradación del medio ambiente.

Es así como se realizará una pre - evaluación social de proyecto, es decir, un estudio de pre-factibilidad sobre una alternativa de solución a este problema que incluye la recuperación del Rio

Cauca, el buen manejo de los residuos biológicos de la ciudad y una recuperación ambiental de zonas claves como lo son el Rio Palo en el Cauca. Este proyecto es la elaboración de una Planta Regional de Biorremediación de aguas residuales. Dicho proyecto solucionaría el problema de raíz, además de ser sostenible a largo plazo buscando el bienestar de la sociedad, y aunque es un proyecto que exige una gran inversión, es una opción viable y con mayores beneficios que otras alternativas ya planteadas como lo es el traer agua de la Salvajina o de Calima, que aunque menos costos, dejan en el olvido a nuestra fuente hídrica más importante, el Rio Cauca, y los problemas ambientales que se agravan con el tiempo. En otras palabras: buscar una pronta solución no implica sólo mantener un servicio fluido, reduciendo costos al dejar en el olvido lugares tan importantes como es el Rio Palo y el Rio Cauca, y no invertir en proyectos que recuperen su estado natural, los cuales día a día se convierten en pozos de recolección de riesgo biológico, desencadenando problemas notorios de salud a la población más deprimida de la ciudad.

Se pretende entonces, como objetivo general, exponer la problemática detallada a partir de los datos sobre los cortes constantes del servicio de agua potable en Cali, el estudio de las diferentes alternativas planteadas, la aplicabilidad, y análisis de costo beneficio sobre la alternativa que se planteará, la cual traer soluciones definitivas a los inconvenientes presentados en la ciudad como lo son el pobre manejo de los residuos sólidos que caen en el canal CVC y posteriormente al Rio Cauca.

Es importante resaltar lo que se entendería por calidad del servicio de agua potable presente en la ciudad de Cali, y de la continuidad del mismo. Al hablar de la calidad del servicio debemos referirnos a temas como la calidad del agua, la limpieza de la misma y la forma como fue tratada, la estructura de tuberías y demás que garanticen un servicio eficiente. La continuidad del servicio debe presentarse a la par con la definición de calidad anterior, en donde no deben existir cortes temporales, es decir que el servicio potable esté presente en cualquier momento en que se le necesite. Estos temas deben tratarse a consideración como contextualización y soporte a la hora de analizar proyectos alternativos de solución a dicha problemática.

## 1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión de lo que ha sido el suministro de agua potable en Cali a partir de la calidad del agua, del servicio, y la continuidad del mismo, al igual que las condiciones que han podido influir los diversos cortes de agua estudiados.
- Identificar las diversas causas o factores que han impedido la prestación de un servicio de agua potable continuo, sin cortes inesperados, al igual que evidenciar los problemas ambientales presentes.
- Identificar y analizar las soluciones que se han planteado y ver su impacto tanto en la sociedad como en el medio ambiente.

- Obtener los costos de la solución alternativa planteada y realizar un paralelo entre viabilidad del proyecto y búsqueda del bienestar social y ambiental.
- Proponer la alternativa que se planteará como una solución que conlleve a un beneficio social y ambiental mayor a otras alternativas, siendo este un proyecto viable.

El trabajo se realizará a partir de una investigación exhaustiva de los acontecimientos en torno al problema de continuidad del servicio de agua potable en Cali en el marco del análisis social de proyectos, analizando cada hecho y situación relevante, como son los problemas ambientales y de salubridad que esto ha implicado en la ciudad y en sus alrededores. Se entrará a investigar qué sucede en cada una de las causas encontradas que afectan directa e indirectamente al problema planteado. Con base en esto se presenta información pertinente de los estudios de las posibles soluciones planteadas, tanto de las alternativas de traer agua de otras vertientes distintos al Rio Cauca, como lo puede ser la alternativa a analizar mediante la metodología del análisis costo-eficiencia, la cual plantea soluciones como la implementación de plantas naturales de tratamiento de agua, el mejor tratamiento de residuos de la ciudad en relación al alcantarillado, entre otros, teniendo en cuenta sus costos y su impacto en el bienestar social y ambiental.

Los datos se buscaron dentro de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, más propiamente del instituto CINARA, al igual que otras fuentes potenciales. De igual modo se argumenta, dentro de las soluciones ya planteadas por Emcali, que la alternativa analizada en este trabajo es la alternativa con mayores beneficios sociales y ambientales que ataca el problema de raíz. Otros datos e información pertinente se recolectaron en base a las exigencias que la investigación ha requerido.

Dado lo anterior, se determina la viabilidad de solución alternativa de la continuidad del servicio potable de agua en Cali a partir de un análisis de costo-eficiencia con base en la metodología de la evaluación social de proyectos tomada de Boardman, Anthony E, et al. (2001) “Cost-benefit analysis: concept and practice”. 2nd ed. Prentice Hall. New Jersey, como primera medida metodológica. El trabajo presenta, de forma general, la siguiente estructura a seguir:

1. Se buscará determinar los diferentes conceptos necesarios como la calidad y la eficiencia de un servicio de agua potable en relación al servicio prestado en la ciudad de Cali, al igual que los problemas que este ha presentado, su evolución y su funcionamiento, al igual que los factores determinantes que agobian su eficiencia.
2. La especificación de las diferentes alternativas de proyecto que se han pensado realizar, como lo es el traer agua de la Salvajina o Cali, como paralelo del proyecto alternativo en la cual se basa este trabajo, y de cual se realizará dicho análisis de beneficio, a partir de una estimación de la efectividad del proyecto.
3. Considerar cuales son los costos y los beneficios de dicha alternativa de proyecto, incluyendo los beneficios ambientales que traería dicha alternativa, resaltando la efectividad del mismo.
4. Catalogar los impactos y seleccionar los indicadores de medición, económica, social y ambiental.

5. Predecir de forma cuantitativa los impactos a lo largo de la vida del proyecto, el cual para este caso se espera sea de muy largo tiempo.
6. Monetizar todos los impactos, para la cual se buscara una metodología acorde a la situación que considere impactos de corte ambiental y social.
7. Descontar los beneficios y los costos para obtener valores presentes.
8. Considerar y llevar a análisis los valores presentes netos (NPV, en inglés).
9. Realizar un análisis de sensibilidad.
10. Establecer recomendaciones basadas en el NPV y en el análisis de sensibilidad, y de esta forma mostrar que dicho proyecto alternativo obtendría una mejora no solo sobre el servicio de agua potable en Cali, sino también una recuperación del medio ambiente y una sostenibilidad de los mismos a largo plazo.

Se debe ir considerando la aplicabilidad de metodologías necesarias para sustentar y argumentar cada uno de los pasos anteriores, y de esta forma llegar a la conclusión de que la hipótesis planteada es verdadera y debe ser, esta alternativa, considerada como proyecto solucionador del problema de continuidad del servicio de agua potable en Santiago de Cali. A lo largo de la revisión de literatura, y de las consideraciones importantes que vayan surgiendo en el desarrollo del trabajo, es posible que metodologías tradicionales como esta queden cortas frente a la necesidad de evaluación y estimación de impactos ambientales y sociales, por ello es importante resaltar diversas metodologías que puedan encaminar una mejor elección a la hora de tomar las herramientas necesarias de estudio.

Al emprender el camino hacia una evaluación de proyecto que busca el mejoramiento del servicio de agua y saneamiento para Cali y la región del Valle del Cauca, es decir alrededor de la ciudad, debemos de tener en cuenta aspectos importantes y diversos antes de medir impactos sociales y ambientales que nos den argumentos para estructurar la viabilidad del mismo. Para iniciar en el análisis de alternativa de solución del servicio de agua, como lo es la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales, es primordial dar una mirada a lo que se ha hecho en relación a mejoramientos en servicios de agua potable y saneamiento, la forma como esta se evalúa, la estructuración de propuestas de trabajo del mismo, términos de eficiencia, sostenibilidad de fuentes hidrográficas y la regulación. No obstante, debemos de considerar la importancia del elemento más importante, el agua.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para la Organización Mundial de la Salud, “El agua es esencial para la vida. La cantidad de agua dulce existente en la tierra es limitada, y su calidad está sometida a una presión constante. La conservación de la calidad del agua dulce es importante para el suministro de agua de bebida, la producción de alimentos y el uso recreativo. La calidad del agua puede verse comprometida por la presencia de agentes infecciosos, productos químicos tóxicos o radiaciones”, de allí la razón de ser de cuidarla, de razonarla eficientemente alterando mínimamente el ecosistema; en la cual el ser

humano falla, pues en muchos casos, como en Santiago de Cali, los vertimientos de agua contaminada al Río Cauca son excesivos.

La guía que nos ofrece la OMS sobre la calidad del agua potable, nos da fundamentos y conceptos relevantes que debemos de tener presentes a la hora de hablar sobre el servicio de agua y saneamiento, y la calidad de la misma; el agua como un recurso esencial, vital y necesario para la vida. Como lo menciona en la primera parte de este documento, el acceso al agua potable es fundamental para la salud, uno de los derechos humanos básicos y un componente eficaz de las políticas de protección de la salud, siendo el agua potable una cuestión primordial en materia de salud y desarrollo en el ámbito nacional, regional y local.

Para la OMS las inversiones en sistema de abastecimiento de agua y de saneamiento pueden ser rentables desde un punto de vista económico, dado que la disminución de los efectos adversos para la salud y la reducción que se ha venido presentando en la asistencia sanitaria muestra ser superior a los costos de las inversiones realizadas, en el sentido de la construcción de grandes infraestructuras de abastecimiento de agua al tratamiento de los hogares; además de mejorar el acceso de agua potable a los pobres, tanto en zonas rurales como urbanas, siendo una estrategia eficaz en búsqueda de la mitigación de la pobreza.

Abordando el tema sobre la evaluación social de proyectos en relación al servicio de agua y saneamiento, tenemos diversos documentos que nos pueden ayudar a comprender y estructurar el objeto de análisis de este trabajo evaluativo, el cual se centra en la viabilidad del proyecto de la Planta Regional de Biorregeneración de Aguas Residuales en búsqueda de impactos beneficios para la sociedad, la recuperación del medio ambiente que ha sido bastante golpeado con excesiva contaminación, y la continuidad del servicio de agua potable para los habitantes de la región.

El libro de Boardman, et al. (2001), es un recurso base para la evaluación social de proyecto que se quiere realizar en este trabajo. En él podemos encontrar diversos temas y conceptos que se desarrollarán durante el proceso de investigación y estimación de cálculos e impactos de beneficios y costos, al igual que el reconocimiento y contextualización del problema a solucionar a partir de la alternativa de la Planta de Biorremediación que se presentará en el trabajo. Este libro se centra en el análisis costo-beneficio, hablando de los aspectos fundamentales de este, la valoración de impactos y la aplicabilidad de otros métodos alternativos como lo son el costo-efectividad, y el costo-utilidad. Siendo entonces una columna vertebral para el desarrollo en el cual nos adentraremos de este análisis evaluativo.

En el libro de “Metodologías de preparación y evaluación de proyectos de inversión pública” (Castro, et al, 2008), se trata de forma detallada el análisis costo-eficiencia, el cual es central para la evaluación del proyecto a tratar. Dado que existe un número amplio de proyectos cuyos beneficios no tienen un precio de mercado explícito o no son cuantificables en términos monetarios, se debe de buscar alternativas al análisis costos-beneficio, como el costo-eficiencia (ACE). Dentro de este análisis existen dos alternativas: costos-eficiencia y costo-eficiencia ponderados. El libro trata subtemas de forma detallada como los Costos unitarios dentro del ACE, Aspectos operativos del análisis costo-eficiencia y las expresiones más utilizadas de los indicadores del ACE. Dicha análisis se trata con mayor detalle en la metodología a implementar más adelante.

Como complemento del anterior, el documento realizado por Contreras (2004), se presenta como un manual de evaluación social al basarse en temas centrales desde la teoría hasta la práctica. Abunda en criterios de comparación de estados de la economía, al igual que los principales enfoques para la estimación, la medición y la valoración de costos y beneficios, y precios sociales. Este manual nos puede brindar la estructuración teórica de una evaluación social de proyectos, al igual que el libro de Boardman, et al. (2001), buscando como interés especial el cálculo de los beneficios y costos sociales.

Los fundamentos teóricos de la evaluación social y la finalidad de los criterios de decisión para acercarnos a una sustentación necesaria que nos ayude a comprender y determinar la viabilidad del proyecto, y llevar estos conceptos a la parte práctica del mismo, resultan fundamentales. Este manual, al igual que el libro de Boardman, et al. (2001), nos brinda la posibilidad de encaminarnos en la decisión de escogencia del método de evaluación, algo que es definitivo a la hora de evaluar un proyecto de grandes magnitudes como lo es la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales.

Entre los criterios de evaluación o metodologías, podemos pensar en un análisis de costo-impacto, o metodología alternativas en el caso de impactos ambientales, a partir de cálculos de beneficios y costos, o evaluación multicriterio. La evaluación tradicional sufre de un problema, y es que cada costo y cada beneficio debe ser identificado, medido y valorado, mas no siempre es sencillo llevar todos los impactos a términos monetarios. Dado esto, la evaluación de costo-impacto es interesante pues se constituye como una aproximación a la razón de beneficio-costos, basándose en otras formas de medición las cuales podemos considerar en el marco teórico, aunque también puede tener sus limitantes.

No obstante, y dada las limitaciones de las metodologías anteriores, es interesante observar la aplicabilidad de la teoría de evaluación multicriterio, la cual comprende un conjunto de teorías, modelos y herramientas, que buscan optimizar un grupo de funciones objetivo dado un grupo de restricciones. Debemos considerar métodos de valoración directos e indirectos en mercados observados y no observados, como son el caso del método de valoración de gastos defensivos o daño evitado, costos de reposición y costo de relocalización, valoración contingente, entre otros. Distintos ejemplos relacionados con la anterior descripción son retomados por Contreras (2004).

Como parte de recolección de herramientas que nos ayuden a establecer bases para analizar la propuesta de solución del servicio de agua y saneamiento para Cali, debemos comprender algunos conceptos importantes en torno a los proyectos de infraestructura públicos y privados. Para ello, Vives et al. (2007) presentan un nuevo marco analítico en torno a la estructuración y viabilidad de proyectos de infraestructura. Este nuevo marco se basa en un enfoque y un conjunto de herramientas como referencia a la estructuración financiera de proyectos que tengan que ver con asociaciones público-privadas enfocada al sector de agua potable y saneamiento, considerando las realidades políticas y económicas de cada país, así como el reconocer los riesgos que se puedan implementar y posteriormente reducirlos.

Como punto clave a considerar en cualquier proyecto que se pretenda realizar, los autores integran tres componentes críticos que encaminan al éxito de los proyectos. El primero de ellos es la

identificación de las condiciones locales que pueden tener un alto impacto en la inversión; segundo, la modalidad del proyecto, cómo se va a hacer y qué tipo de proyecto es, y tercero, las herramientas disponibles para reducir los riesgos originados en las condiciones locales. Se ofrece entonces una orientación e ideas sobre la manera en que la combinación de estos factores puede dar lugar a otras estructuras o formas de proyectos para asegurar su viabilidad. Lo anterior se desarrolla de manera sistemática al empezar por la identificación y el análisis de condiciones locales, seguido de una revisión y evaluación de modalidades potenciales y posteriores mejoras potenciales dado los impactos generados por la reducción y presencia de riesgos.

Es interesante conocer un poco sobre la eficiencia y medición de los prestadores de servicios de agua y saneamiento, en el sentido de que se debe entender la dinámica que rodea el prestar un servicio vital como lo es la distribución y descontaminación del agua desde un contexto económico. Para ello, Ferro et al. (2011), relatan la forma como la profesión económica se ha encaminado al problema de la medición y evaluación de eficiencia en empresas prestadoras de servicios públicos, centrándose en el agua potable y alcantarillado. En este trabajo se discute el concepto de eficiencia en términos físicos y económicos, el estado del arte de este concepto y cómo se desenvuelve dicha eficiencia en una empresa de servicios públicos dada su infraestructura, resaltando una serie de problemas concretos y su solución en la práctica.

El concepto de eficiencia física y económica como factor determinando para entender si el sistema de agua y saneamiento, puede servirnos como herramienta para observar si el servicio de agua y saneamiento de la ciudad de Cali cumple con los objetivos planteados, y más aun con la infraestructura para abastecer continuamente a la población caleña dada su alta demanda que ha venido creciendo en los últimos años, en el marco de la sustentabilidad del servicio, más productivo y menos costoso, pues incurren en una información interesante a la hora de hablar de costos medios, efectivos, determinantes en el desenvolvimiento del sistema.

Adentrándonos un poco a los costos que implicaría un proyecto de agua y saneamiento en la región, debemos de considerar dos puntos importantes: costos de operaciones técnicas administrativas, e impactos y costos en el medio ambiente y tratamiento del recurso natural desde su fuente de origen; para ello debemos de encontrar metodologías o ejemplos que nos ayuden a contextualizar un poco sobre el tema. Por el lado de costos de operaciones técnicas y administrativas, Salamanca (2001), realiza una comparación de las empresas de acueducto y alcantarillado en Colombia mediante la desagregación de sus procesos y costos de administración, operación y mantenimiento. Este trabajo contextualiza la aproximación de la operación y los costos que podríamos considerar a la hora de evaluar la viabilidad del proyecto de biorregeneración regional, dada la aproximación y la metodología que podríamos abordar para analizar este tema.

Ahora, en relación al impacto ambiental y tratamiento del recurso natural, Arias (2005), evalúa el desarrollo sostenible en la cuenca hidrográfica del río Tuluá, como un estudio de caso dentro del contexto de los planes de ordenamiento ambiental de cuencas hidrográficas en Colombia. En primera instancia, lo que realiza el autor es identificar los recursos naturales con sus principales atributos y las relaciones de éstos con el sistema humano, como marco conceptual para desarrollar el tema. Es decir que este trabajo nos está brindando una forma de observar las interacciones entre individuos y

el ecosistema, buscando quizás una forma de capturar los efectos en el medio ambiente que nos pueden conllevar a la medición de costos y beneficios ambientales. Seguido de esto, el autor, a la luz del marco conceptual propuesto, se discuten los enfoques de desarrollo sostenible que serían apropiados para una cuenta hidrográfica y se evalúa en consecuencia el estado en que se encuentra la sostenibilidad de la cuenta del río Tuluá.

Para el autor, a pesar de que existe un acuerdo sobre el marco conceptual general del cual deben regirse los planes de ordenamiento territorial, no existe un esfuerzo académico detallado del tema; quizás se aun tema interesante de explorar y realizar una serie de críticas constructivas e investigativas, que indique que es una cuenta hidrográfica como sistema de análisis. Este trabajo establece elementos principales y las relaciones que conforman y ayudan a explicar el funcionamiento de una cuenta hidrográfica, tomando como ejemplo la cuenta del río Tuluá dado que se encuentra en proceso de ordenamiento territorial. Dado lo anterior, se debe establecer cómo este sistema puede perdurar a través del tiempo, bajo qué criterios puede considerarse como cuenta sostenible, dado el gran debate que existe para determinar que es un desarrollo sostenible, (Arias, 2005).

Dada la descripción en este trabajo, el autor brinda una serie de herramientas de cómo analizar este tipo de trabajos, los cuales se debe tener en consideración dado que es un punto clave para entender la dinámica del proyecto de Biorremediación Regional que se quiere evaluar, como punto de partida de entendimiento y contextualización en aspectos ambientales e impacto y regulación del mismo. Además de ello, el autor brinda una serie de referencias bibliográficas adicionales que se podrían consultar más adelante.

Ya teniendo una mirada más clara sobre el tema, es importante conocer el contexto actual en que se encuentra Colombia en torno al sector de servicio de agua y saneamiento. Salinas (2011), en su trabajo sobre retos a futuro en el sector de acueducto y alcantarillado, habla de algo que es esencial conocer a la hora de realizar proyectos de este sector, siendo de suma importancia a la hora de emprender en la discusión de la viabilidad política y concurrencia del funcionamiento de sistemas de agua en forma regional, que pretenden mejorar la cobertura, eficiencia y calidad de la prestación del servicio. El autor parte describiendo los PDA o Planes Departamentales de Agua y Saneamiento, que plantean una financiación para los sistemas de agua y saneamiento a cargo de los municipios beneficiados, de los departamentos y la Nación. No obstante, la implementación del PDA ha demostrado ser poco efectiva.

Dado lo anterior, la División de Recursos Naturales e Infraestructura de la CEPAL, organizó lo que se conoce como la Superintendencia de Servicio Público Domiciliarios (SSPD) de Colombia, la cual se encarga de vigilar y controlar la presentación eficiente, competitiva y sostenible de los servicios públicos y proteger los derechos de los usuarios, algo esencial a la hora de implementar un sistema que pretenda solucionar diversos problemas presentes en la ciudad. Evidentemente cambios en las instituciones y la fomentación de los mismos hacen parte del análisis de sostenibilidad de un proyecto, dado el engranaje que debe de tener el funcionamiento estructural y el impacto y responsabilidad con la sociedad.

El artículo describe la situación actual de los servicios de acueducto y alcantarillado, con base en la caracterización de los prestadores del servicio, indicadores, aspectos financieros, menciona los tipos de tratamientos que es importante revisar a la hora de comprender aspectos técnicos del proceso de tratamiento de aguas residuales, y unas conclusiones de lo que hasta ahora se ha venido presentando en el sector.

El autor concluye que Colombia se encuentra en el camino correcto para lograr las metas de cobertura y calidad del servicio de agua potable y saneamiento, pero se requieren ciertos cambios que no distorsionen el llegar a estas metas. Resalta que es necesario definir los esquemas adecuados para el financiamiento del tratamiento de agua potable, y residuales, que se establezca una política al respecto; es posible que aquí nos genere una inquietud, y es ¿De qué forma se deben financiar dichos tratamientos de tal suerte que la carga de los costos no recaiga sobre los usuarios, y que sea política, social y económicamente viable?

En el marco de la evaluación social de proyectos, es interesante conocer otros ejemplos de proyectos e implementación de servicios de agua y saneamiento que han tenido diversos efectos, benéficos o no, dentro del bienestar de la sociedad y el medio ambiente, al igual que la calidad del servicio, tomándolas como experiencias y lecciones a la hora de implementar una solución en nuestra región. Para ello, los siguientes autores nos brindan una mirada general que debemos de considerar y profundizar dado el caso.

Lentini (2011), desarrolla un análisis comparativo entre dos experiencias de América Latina, las cuales son las zonas urbanas de Chile y el Área Metropolitana de Buenos Aires. Este trabajo buscó identificar los factores institucionales, regulatorios, macroeconómicos, empresariales y de estructura y organización dado el desempeño. A partir de estos casos, se extrajo diferentes conclusiones y lecciones sobre el tipo de políticas y organizaciones institucionales que fomenten el alcance de los objetivos y metas que se ha impuesto el sector, dada una identificación de mejores prácticas para alcanzar una mayor eficiencia y financiamiento que conlleven a la sustentabilidad del servicio de agua y saneamiento.

Como lecciones que nos ayudan a observar, comparar y sacar conclusiones a partir de ellas, Vergès (2010), para el caso de Alemania, Francia e Inglaterra, presenta un análisis de la prestación de servicios de agua y alcantarillado de estos países, centrado en la eficiencia económica, la equidad social y sustentabilidad ambiental. Existen modelos de administración y asignación de infraestructura de este servicio en los cuales se identifica la manera en como esta es gestionada, bien sea de manera pública o privada, y su impacto en la sociedad, o usuarios. Estos modelos se aplican en diversas partes del mundo y traen una serie de ventajas o desventajas, las cuales debemos de analizar para tener presente el impacto que traería un proyecto de agua y saneamiento en la sociedad.

El autor en la primera parte del documento expone las características comunes de la prestación de los servicios en los tres casos analizados, comparando y diferenciando cada una de estas en las tres ciudades, identificando lecciones que pueden considerarse para el futuro de América Latina y el Caribe. Es importante resaltar que el objetivo de su trabajo es el relevar la importancia del contexto

socioeconómico y de los marcos de organización industrial y regulatoria en el sector con la intención de mejorar la prestación de servicios de agua potable y saneamiento para Latinoamérica.

En búsqueda de beneficios potenciales y determinantes el éxito de un proyecto en el sector del servicio de agua, Lentini (2010), para el caso de agua potable y saneamiento en Guatemala, pretende formular políticas públicas para este sector a partir de la descripción del estado de la situación del sector, la identificación de los impactos de la prestación de servicios, los análisis de los factores determinantes del desempeño y la sustentabilidad de la prestación del mismo y finalmente unas recomendaciones. Como podemos ver, este trabajo tiene un mismo lineamiento de estructura en el desarrollo del tema similar a otros ya nombrados. Podemos entonces pensar en que dicha estructura puede ser adecuada a la hora de contextualizar al problema de abastecimiento de agua potable y saneamiento en la ciudad de Santiago de Cali; por ejemplo la identificación de los impactos actuales y potenciales son herramienta clave para argumentar una alternativa de proyecto.

Para el autor, la importancia de la estimación o cálculos de los impactos está dada por la posibilidad de realizar un análisis costo-beneficio que puede ser utilizado como herramienta de asignación de fondos en acciones o inversiones en el sector. De igual forma, permite la evaluación de la conveniencia de un determinado proyecto al tiempo que resulta útil para decidir entre distintos proyectos de agua potable y saneamiento - según zona geográfica - o entre servicios con diversas infraestructuras y calidad del mismo, Lentini, (2010). Esta estimación de impactos puede conllevar a tomar dimensiones de la envergadura de los beneficios que se asocian, observando entonces quienes son los potenciales beneficiados y quienes podrían verse perjudicados, conociendo entonces los efectos redistributivos; algo interesante a la hora de calcular beneficios del proyecto alternativo.

Sin embargo, el autor señala que tiene cierta dificultad poder cuantificar todos los impactos mencionados desde aspectos metodológicos, partiendo de la cantidad y calidad de la información disponible, como el volumen de trabajo que este implica para cuantificar. Por ejemplo podemos encontrar la presencia de múltiples efectos indirectos dificultando la posibilidad de aislar efectos y asignar de forma precisa el peso relativo del factor acceso y calidad del agua, la retroalimentación de algunos efectos que pueden llegar a una sobrestimación o duplicación de beneficios (Lentini, 2010). El autor presentar factores determinantes del desempeño y de sustentabilidad del servicio, como factores exógenos y endógenos, en subcategorías que explican la influencia de cada una de estas en el contexto, al igual que la gestión y financiamiento de los prestadores, desde la importancia de priorizar el sector desde un enfoque de bienestar y desarrollo socioeconómico. Si tener en cuenta todo lo anterior, el análisis costo-beneficio puede quedar un poco corto a la hora de realizar la evaluación del proyecto alternativo.

El trabajo realizado por Vergès (2010), con base a diversas experiencias en Europa Occidental, América Latina y otras partes del mundo, considera diversos temas en relación con marcos institucionales y contratos en agua potable y alcantarillado. Estos analizan tres puntos importantes. El primero de ellos es el nivel administrativo-territorial de autoridades públicas responsables de los servicios; el segundo es la naturaleza jurídica de los organismos prestados; y tercero, el tipo de contrato que regula la relación en ambas partes. Al efectuar comparaciones de experiencias entre

diversos servicios de agua potable y alcantarillado, este trabajo puede brindar información relevante a la hora de fomentar un desarrollo institucional del sector analizado.

Dado lo anterior, al tener este tipo de información podemos entrar a debatir la sostenibilidad y lo que necesita Santiago de Cali en tema de agua, tratamiento, distribución y recuperación de las cuencas hídricas, dado que si tenemos un marco de referencia que nos refleje la dinámica de diversos servicios en el mundo, los cuales están sujetos a políticas y condiciones geográficas diferentes entre ellas, podemos llegar a componer lo que la ciudad realmente necesita, además de entender cuestiones jurídicas del manejo de este tipo de servicios, algo vital para entender el impacto social que el proyecto puede generar en la ciudad.

Como ejercicio de ilustración del esquema de un proyecto, podemos observar la estructuración del programa de agua potable y saneamiento del área metropolitana de la ciudad de Buenos Aires y del Conurbano, en el sentido de mejorar y ampliar el servicio. El proyecto realizado pretende mejorar la confiabilidad del sistema de tratamiento y distribución del agua potable, disminuir las pérdidas físicas, ampliar el servicio de alcantarillado y expandir la capacidad de conducción y tratamiento de aguas residuales, al igual que monitorear una eficiente implementación de planes estratégicos y financieros.

Para esta propuesta de proyecto, se plantea una estructura. Esta empieza con los antecedentes, el problema y la justificación, seguido de la estructura sectorial y la prestación del servicio, las evaluaciones de los estados del proyecto en cada uno de los casos, un estado de avance en la ejecución de los componentes del programa, un análisis del cumplimiento o no de los indicadores de desempeño, y finalmente unas lecciones aprendidas del proceso. Además de esto, se plantean esquemas de ejecución de la infraestructura y administración de los proveedores del servicio de agua y alcantarillado, las cuales entre ellas se encuentra la estructura financiera, la operación y mantenimiento. Dado lo anterior, se debe incurrir en un análisis de viabilidad de forma técnica, socioeconómica, capacidad de pago y equidad social, y reducción de la pobreza, evaluación ambiental, entre otros. Se realiza entonces un monitoreo y evaluación en relación a auditorías y evaluación, y los riesgos operacionales a los cuales se puede llegar.

Aunque es importante realizar una revisión bibliográfica del tratamiento de las aguas residuales en general, la forma de evaluación de los procesos convencionales de tratamiento y experiencias en sistemas de alcantarillado en diferentes países, es relevante comprender lo que se ha realizado respecto a tratamientos alternativos como lo son las lagunas de estabilización, o anaerobias; también las diferentes evaluaciones técnicas de estas. Para ello, es posible nombrar tres autores que han encaminado sus investigaciones en estos temas, dado que el proyecto a evaluar en este trabajo se relaciona directamente con esta alternativa tecnológica a la cual se le ha venido apuntando en nuestro país.

El trabajo realizado por Martínez (2003), se enmarca en un análisis comparativo de criterios de diseños de lagunas de estabilización para ciudades pequeñas y medianas. Compara diferentes tipos de diseños de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales municipales, utilizando diferentes modelos matemáticos que “proporcionen las mejores eficiencias de remoción de carga orgánica”. El autor pretende seleccionar el diseño que proporcione la mejor alternativa de

tratamiento, aplicando métodos empíricos, semi-empíricos y cinéticos. Además de ello da recomendaciones para un mejor diseño, tratamiento de lagunas estabilización. Resalta las características de las aguas residuales, como “aguas usadas o los sólidos que por uno u otro medio se introducen en los albañales y son transportados mediante el sistema de alcantarillado” Martínez, 2003. Menciona parámetros físicos, químicos y biológicos.

Menciona los mecanismos de tratamiento de aguas residuales municipales. El autor realiza una breve introducción de los conceptos que enmarcar dicho tema, además del pre tratamiento, el tratamiento primario, tratamiento secundario o biológico, entre otros temas. El trabajo realizado por Martínez (2003), es un trabajo que contiene diversos apoyos metodológicos para comprender el funcionamiento de este tipo de tratamiento de aguas residuales, con una escritura sencilla y clara; es una guía importante para contextualizar proyectos alternativos para ser evaluados como benefactores de la calidad de vida de los habitantes del municipio de Santiago de Cali y sus alrededores.

Durán, (2009), realiza una evaluación del desempeño de un conjunto de lagunas para el tratamiento de aguas residuales propiamente del canal de Tibanica en el municipios de Soacha, Departamento de Cundinamarca. En sí, el trabajo evalúa el rendimiento del sistema piloto lagunas de estabilización que opera en el lugar. Presente en los antecedentes con amplia información sobre el caso a tratar, además de la descripción del funcionamiento del sistema de tratamiento con lagunas en la Sabana de Bogotá, otras experiencias internacionales aplicadas al caso, un marco metodológico muy detallado, la explicación del mecanismo de remoción orgánica en las aguas residuales por las lagunas de estabilización, seguido de una análisis de resultados. Por su parte, Correa (2008), realiza una evaluación y monitoreo del sistema de lagunas de estabilización del municipio de Santa Fé de Antioquia, que sirva para interpretar su funcionamiento en términos hidráulicos y cinéticos, eficiencia en remoción de la carga orgánica, y la identificación de los problemas ambientales asociados a la implementación de este. La autora utilizado como metodológica información de muestreos de campo y trabajo de laboratorio, al igual que una revisión de información de caracterizaciones realizadas durante varios años.

Peña (2002), desarrolla un artículo como el tratamiento sostenible de aguas residuales domesticas en región es tropicales. El autor introduce el concepto de lagunas anaerobias de alta tasa para el tratamiento primario avanzad de aguas residuales domesticas “como una alternativa factible” para el contexto de tratamientos a bajo costos. Plantea una metodología que se realizó con la colaboración del instituto CINARA de la Universidad del Valle en Cali, Colombia, en donde se comprendieron dos fases: estudios a escala real de dos laguna anaerobias convencionales, y un estudio piloto de las lagunas con las modificaciones planteadas por el autor; además evaluó, entre otros aspectos, la eficiencia de remoción de materia orgánica en estado estacionario. Plantea con detalle los resultados, variables, y diseños relevantes de las lagunas planteando discusiones frente al tema.

Con una mirada más global, Torres (2012), plantea una perspectiva de tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. Realiza una introducción detallada sobre distintos temas que encaminan el tema del tratamiento de las aguas residuales en los países en desarrollo, en comparación con los países desarrollados. Entra en detalle en la descripción sobre las

aguas residuales domésticas y sus niveles de tratamiento. Plantea una selección de tecnologías de tratamiento, la aplicación de estas tecnologías en el tratamiento anaerobio y finaliza con unas perspectivas futuras de aplicaciones de tecnologías para los países en desarrollo. Por ejemplo, la autora expresa que “La situación presentada muestra que la aplicación de la tecnología anaerobia, antes de competir con los sistemas de tratamiento convencionales, los complementa, reduce costos y permite que se logren resultados mejores de los que se podría esperar con el uso de tecnologías que trabaja de modo independiente”. Finalmente cierra con unas conclusiones acertadas sobre el tema, el cual deja abierta la posibilidad de analizar el tema del tratamiento anaerobio como una alternativa de bajo costo y alta eficiencia para los países en vía de desarrollo.

Una vez hecha la revisión bibliográfica constructiva, debemos recalcar que la propuesta a analizar en este trabajo se enmarca dentro de lo que concierne a la evaluación de un proyecto en el ambiente del servicio de agua y saneamiento. En este tipo de evaluación, se deben considerar diversos enfoques y conceptos relevantes a la hora de tomar decisiones de funcionamiento, de impacto ambiental, de política económica y de metodología en los indicadores que nos ayuden a estructurar sólidamente los argumentos suficientes para realizar un buen análisis que encamine a la viabilidad del proyecto de la Planta Regional de Biorremediación de Agua Residuales en la región del Valle del Cauca, además de dejar un interés investigativo sobre el impacto que puede generar dicha alternativa de tratamiento sobre distintos ángulos, como en el campo de la salud al producirse menores índices de enfermedades por la reducción de contagio por aguas residuales, entre otros temas. Cabe mencionar que todo lo anterior deja diferentes criterios sobre la forma en que debe realizarse una evaluación para este tipo de proyectos; el aspecto que deja mayores posibilidades abiertas a una discusión es la metodología en la cual se deben medir los impactos ambientales y sociales.

### 3. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

La evaluación social de un proyecto parte de la identificación, medición y valoración del conjunto de beneficios y costos, teniendo como referentes criterios de bienestar social. La rentabilidad social se deriva de la contrastación de la situación inicial y de la que se deriva de la puesta en marcha del proyecto (Contreras, 2004). Es por ello que la evaluación de un proyecto debe incorporar distintos aspectos que resultan relevantes, como lo es la escogencia de una metodología adecuada y un enfoque teórico y conceptual clave.

El análisis que se realizará en este trabajo, induce a que el planteamiento de una evaluación tradicional puede no ser adecuada debido a la dificultad de medición de algunos impactos, o llevar a términos monetarios algunos costos y beneficios. Para ello, como una aproximación a la metodología a utilizar, es posible plantear dos propuestas que se encuentran entre la rigurosidad y la complejidad como herramientas: la Evaluación Multicriterio y la de Costo-Eficiencia. La estimación de los beneficios son difíciles de obtener, por ello en el caso de la evaluación de Costo-

Eficiencia, y dado que los costos suelen ser más fáciles de valorar, es posible constituir una razón Eficiencia/Costo como aproximación a la razón Beneficio/Costo, o una razón Costo/Eficiencia. Aunque no podemos transformar el impacto en beneficios de forma directa dada la dificultad de valorarlo en términos monetarios, se puede realizar aproximaciones. Por ejemplo, la implementación del costo de un programa en el cual reduciría la cantidad de personas asesinadas en cierto sector de la ciudad, sobre la cantidad de personas del sector.

Si se utiliza una razón de Eficiencia/Costo, se selecciona la alternativa de mayor razón dado que se tendrá un mayor impacto, con el menor costo. Al usar la relación Costo/Eficiencia, se escogería la alternativa con menor razón. Ahora, es posible que se obtengan diferentes impactos por considerar, donde se debe calcular el impacto total agregado los impactos individuales de forma ponderada. Dado que dicho procedimiento puede llevar a inconsistencias, se deben plantear soluciones alternativas, las cuales se consideren como punto de comparación para la obtención de resultados más rigurosos. No obstante, este tipo de metodología puede ser apropiada para el análisis de proyecto de la planta de biorremediación de aguas residuales dado que dicho método, aunque no permite mostrar la viabilidad de un proyecto por individual, es útil a la hora de comparar proyectos entre sí. Tomando como paralelo el proyecto propuesto por Emcali en relación a la Segunda Fase de la planta de Puerto la planta de Cañaveralejo y el proyecto de la planta de biorremediación, este tipo de análisis puede ser el adecuado.

Se debe tener en cuenta los impactos ambientales, costos y beneficios, para los cuales no se tiene un mercado definido donde se observe precios y cantidades a partir de los cuales se puede aplicar metodologías de costo/beneficio; se debe recurrir entonces a metodologías alternativas. Es posible clasificar dichas metodologías según su aplicabilidad directa o indirecta para la obtención de información. En el caso de los métodos directos se tienen Mercados Simulados, la Metodología Tradicional, y la Evaluación Contingente. En el caso de los métodos indirectos, tenemos los Precios Hedónicos, Costo de Viaje, Costo de reposición y el Daño Evitado.

Los métodos directos en mercados observados se basan en precios disponibles u observaciones de cambios de productividad. Se aplican cuando un cambio en la calidad ambiental o disponibilidad de un recurso, afecta la producción o productividad. La fuente de información se basa en parámetros que reflejan conductas observadas como los precios pagados o gastos efectuados reflejada en mercados convencionales (Contreras, 2004). Por ejemplo la fuente de información puede provenir de los cambios en productividad, en la pérdida de ganancia reflejada en efectos en la salud. Estos métodos son una extensión directa del análisis costo-beneficio, y dichos cambios en la productividad o en la ganancia pueden ser valorados usando precios económicos normales o corregidos cuando se presentan distorsiones en el mercado

Para el caso de los métodos de Valoración Indirectos en mercados observados tenemos el Costo de Oportunidad, Valores directos de gastos, Método de Costo-Efectividad, Gastos defensivos o Daño Evitado, Costo de reposición, Costo de Relocalización, Valores de Gasto Potencial (el cual incluye los precios hedónicos, diferenciales de salario y costo de viaje). En el caso de los Gastos Defensivos o Daño evitado, en el cual se pretende estimar el valor de un daño ambiental a través de gastos efectivos realizados por los individuos, firmas, gobierno o comunidades, para la prevención o

disminución de efectos ambientales no deseables, o como revertir daños ocurridos; y dado que los daños ambientales son regularmente difícil de evaluar, la información brindada por los gastos defensivos constituye una aproximación a ese valor. Este método puede ser una buena alternativa de escogencia como metodología final para realizar la viabilidad del proyecto de Biorremediación de Aguas Residuales de Cali, dado que aquí intervienen los individuos, firmas o gobierno como actores en el plan del mejoramiento de los problemas de servicio de agua y sanidad en Cali, en donde el método asume que dichos actores juzgan el beneficio resultante de sus gastos como mejoras a los costos.

Como parte de los nuevos desarrollos metodológicos que se viene dando en los últimos años, se ha planteado la evaluación multicriterio. La teoría de evaluación multicriterio comprende un conjunto de teorías, modelos y herramientas de apoyo a la toma de decisiones, aplicable no sólo al análisis de inversiones sino a una amplia gama de problemas en la gestión tanto privada como pública (Contreras, 2004). El método Costo-Efectividad será descrito en mayor detalle en la metodología y marco teórico a plantear, en la cual se busca establecer cuál es la mejor metodología para realizar el análisis de pre-factibilidad del proyecto de Biorremediación de aguas residuales, buscando el mejor sustento teórico y práctico para argumentar la viabilidad de este. Se debe tener ciertos criterios y parámetros acorde a la situación a analizar para determinar una buena elección metodológica; además, este trabajo tendrá limitaciones a la hora de abordar un análisis completo, dado que no se tiene muchos datos y variables para realizar grandes análisis. Se centrará en la descripción, comparación, estimación de costos, identificación de beneficios sociales y se realizará una perspectiva de análisis ex – post, o de factibilidad, como fundamento teórico y práctico para el desarrollo de otros trabajos que deseen impulsar una investigación de, por ejemplo, el impacto en la sociedad en términos de bienestar (salud, ingresos, externalidad positivas y negativas), de la implementación del proyecto aquí desarrollado.

#### 4. PERSPECTIVA DE ANÁLISIS DEL PROYECTO

Para realizar una evaluación del proyecto sobre la planta de Biorremediación regional, se puede tomar como base el análisis Costos – Beneficio, el cual plantea unos pasos básicos de estructuración de la información y la evaluación; no obstante, se utilizará el análisis Costo-Efectividad para determinar los indicadores necesarios y cuantías que determinen la viabilidad del proyecto. Tomando como referencia la estructura planteada de Boardman, et al, (2001), se debe de:

1. Especificar el conjunto de proyectos alternativos
2. Decidir cuáles son los costos y beneficios a la sociedad (eficiencia para propósitos de análisis) de los distintos proyectos
3. Catalogar los impactos y seleccionar la medición de los indicadores
4. Predecir los impactos que se tendrán a lo largo de la vida del proyecto
5. Monetizar los diferentes impactos (Si es necesario en términos de búsqueda de beneficios dado la efectividad del proyecto)

6. Descontar los beneficios y costos para obtener valores presentes
7. Calcular el valor presente neto (VPN) en las diversas alternativas, y el mínimo valor presente de los costos (VPC).
8. Realizar un análisis de sensibilidad y riesgo.
9. Hacer recomendaciones basadas en el NPV y el análisis de sensibilidad.

## 5. CONJUNTO DE PROYECTOS ALTERNATIVOS

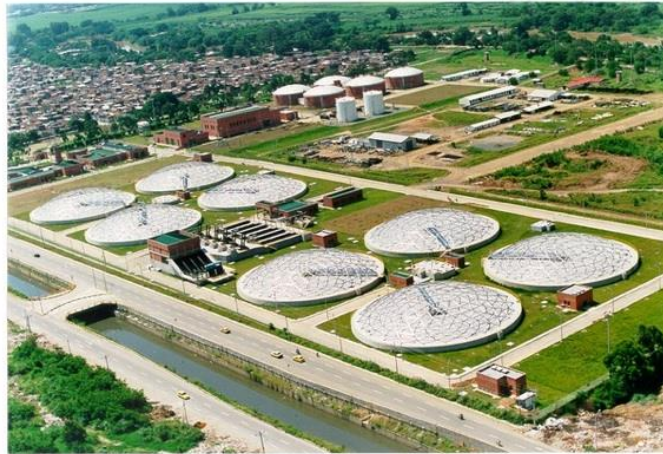
El proyecto propuesto por Emcali pretende realizar una inversión poco efectiva sobre la Planta de Cañaveralejo para el mejoramiento en el tratamiento de las aguas residuales, las cuales no solucionan los diversos problemas observamos en la región. Ésta, plantea un porcentaje mayor de limpieza de las aguas residuales antes de ser vertidas al Rio Cauca, a un costo mucho mayor que el proyecto de la planta regional de Biorremediación de aguas residuales que se evalúa en este trabajo. Dada las características del proyecto evaluadas durante este trabajo, hay motivos y argumentos suficientes para pensar que esta planta de Biorremediación es la solución acertada y debe considerarse con responsabilidad e interés en la planeación y desarrollo del municipio y la región del Valle del Cauca.

### 5.1 SEGUNDA FASE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CAÑAVERALEJO

El proyecto que planteado por Emcali (Empresas Públicas Municipales de Cali) para el tratamiento de las aguas residuales del municipio de Cali, es la de la ampliación de la Planta de Tratamiento de Cañaveralejo para que ésta sea capaz de realizar un tratamiento secundario. Emcali Emprendería un plan de inversiones en acueducto y alcantarillado entre el año 2013 y 2014, con el fin de ampliar cobertura y mejorar la calidad del servicio. Según Emcali E.S.P, el plan de inversión es de \$1,6 billones y será financiado con recursos propios y con dineros que la nación prometió devolver a Emcali por pago de la deuda de la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales).

En relación al acueducto, se ampliaría la cobertura a 773.753 habitantes para llegar al 99.5%, disminuyendo el índice de agua no contabilizada al 38%, que actualmente se encuentra alrededor del 49,4%). En alcantarillado, las obras permitirán, según Emcali, ampliar la cobertura a 736.162 habitantes (alcanzando una cobertura de 96%) y se lograría un impacto ambiental positivo por el mejoramiento de la calidad de agua que la PTAR de Cañaveralejo vierte al Rio Cauca, pues se removería el 85% de la contaminación.

Figura 1. PTAR.



Fuente: Emcali. 2012

El proyecto planteado por Emcali requiere una inversión cercana a los *240 millones de dólares* para descontaminar las aguas efluentes vertidas diariamente al Río Cauca Según el Ing. José Cerón, Jefe de Aguas Residuales de Emcali. (El País, 24 de abril de 2013). Esta cifra es demasiado alta para unos procesos que no mejoraría sustancialmente los diversos problemas que se encaminan en torno a los problemas de contaminación municipal y de la región. Se presentaría como una alternativa que solamente resolvería, parcialmente, un problema, y que cargaría tributariamente a la población del Valle del Cauca con una deuda innecesaria, si tenemos en cuenta que no se ha terminado de pagar el costo asociado a la implementación de la primera fase años atrás.

## 5.2 PLANTA REGIONAL DE BIORREMEDIACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES – PTARR

Douglas Laing, Ing. Agrónomo, Pd.D. Investigador independiente de agricultura tropical y el medio ambiente, plantea el concepto de una planta regional de Biorremediación con niveles primario, secundario, terciario y cuaternario de tratamiento de aguas residuales en máximo 800 hectáreas de tierra salinizadas.

Este proyecto busca una solución efectiva, económica, rápida y eficiente ambientalmente para reducir la contaminación del río Cauca desde las aguas residuales del Canal-Sur y otras fuentes. Esta solución también puede facilitar la recuperación de todos los canales del sistema de drenaje fluvial de Cali. Además de ello, esta solución puede ser un modelo para otras ciudades y municipios del Valle del Cauca y Colombia, en general donde las aguas residuales urbanas contaminan severamente los recursos hídricos del país.

## 6. LA SUSPENSIÓN DEL SERVICIO DE AGUA EN SANTIAGO DE CALI

Para Laing (2013), existen dos causas principales de las suspensiones del servicio de agua potable en Cali, el cual ha sido expresado en las diferentes presentaciones que ha tenido del proyecto a analizar. Una es la Turbiedad asociada con escorrentías desde la cuenca del río Cauca por debajo de Salvajina, especialmente desde el río Palo, la cual representó aproximadamente el 10% de los cortes desde 2003. Otra, es la contaminación desde Cali con aguas residuales y desechos sólidos principalmente desde el Canal Sur, el cual representó el 90% de los cortes del servicios desde el 2003.

Dado el problema constante que se presentaba de los cortes del servicio de agua en la ciudad de Cali, Emcali optó por la construcción del Reservorio de Puerto Mallarino desde 2008. No obstante, los 80.000m<sup>3</sup> no fueron suficientes para evitar cortes de agua potable, con 43 cortes en el 2013. Se piensa que cada una de estas interrupciones causa daños al viejo acueducto por las altas presiones asociadas con los Golpes de Ariete durante la restauración del servicio.

Es claro que con los canales fluviales excesivamente contaminados que tiene Cali, es difícil pensar en una ciudad moderna, próspera e Incluyente (Laing, 2013). Es de considerar las mediciones de contaminantes orgánicos en las aguas vertidas al río Cauca desde Cali y los municipios vecinos. A partir del informe del Proyectos Switch (2009), en relación a la fuente de aguas residuales, la PTAR de Cañaveralejo transmite aproximadamente 45 toneladas diarias de DBO<sub>5</sub>, el Canal Sur 14,2, Colector Margen Izquierda 10,9, PTAP Puerto Mallarino con 7,2, Estación paso del Comercio 5,8, y la Estación Florarúa con 4,4, para un total de 87,5 toneladas de DBO<sub>5</sub> que se descarga desde Santiago de Cali. En el caso de Yumbo, Palmira, Rozo, Jamundí, Candelaria, Villa Gorgona, Zona Franca y Aeropuerto (Estimado en base a la población), el total de contaminación orgánica producida por estos es de 22,5 toneladas de DBO<sub>5</sub>. En total, para Cali y la Región, se producen aproximadamente 110 toneladas de DBO<sub>5</sub>.

Recientemente, para el año 2013, durante los días soleados y en tiempos secos el mal olor del río Cali es bastante fuerte. Según el borrador del POT de Cali de 2013, un promedio de 10,8 toneladas de DBO<sub>5</sub> son vertidas al río Cali diariamente, derivadas de las fuentes de aguas residuales piratas de la cuenta del río. La PTAR de Cañaveralejo está situada a 3,2 km por debajo de la PTAR de Puerto Mallarino. Es aquí donde Emcali plantea la construcción de la segunda fase de la PTAR, para solucionar la contaminación producida en estos dos puntos. Pero realmente el problema más crítico es la contaminación desde el Canal Sur situado a 11 km arriba de Puerto Mallarino. Es decir, que al invertir USD \$240 millones en la segunda fase de la PTAR de Cañaveralejo, no se va a mejorar la situación para Cali, relacionada con los recortes de agua potable desde la PTAP de Puerto Mallarino y PTAR Río Cali. Ver figura 4, *Vista de ubicación de la PTAR y la PTAP*.

Laing (2013), resalta que estos problemas inmediatos son parte de una cadena de factores ambientales y sociales. Entre ellos se resalta la deforestación y la presen cencia de ganadería extensiva en las laderas de las Cordilleras Occidental y Central en la cuenca del río Cauca. La falta

de reforestación en las laderas, erosión y degradación de los suelos, pérdida de biodiversidad en los bosques Andinos, asentamientos informales en Cali, minas de carbón, oro, canteras, gradas ilícitas sembradas en el Bosque de Húmedo Andino, la falta de caudal desde Salvajina en momentos críticos para diluir la contaminación, el cambio del microclima en Cali por razón de urbanizaciones sin vegetación y el cambio climático mundial específicamente los efectos de La Niña y El Niño cada vez más intensos. Ver tabla 16. *Valor de los elementos encontramos en el agua.*

*El Problema más crítico es la contaminación desde el Canal Sur situado a 11 km arriba de Puerto Mallarino*

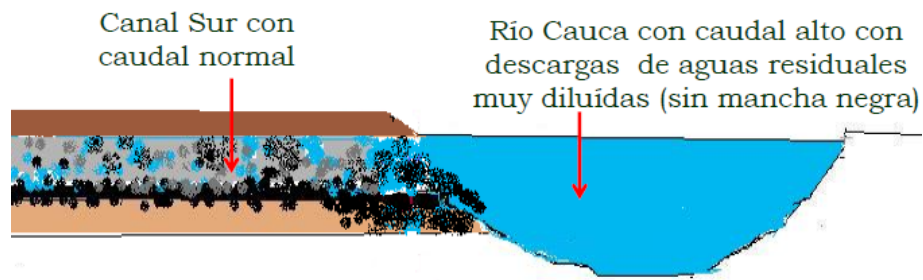
El Canal Sur, según el Proyecto Switch (2009), diariamente arrastra, en promedio 13,6 t de DBO<sub>5</sub> diarios para el año 2007 y 14,2 DBO<sub>5</sub> para el año 2009. Parte de estos contaminantes puede ser originarios de las Lagunas de los lixiviados y de Navarro, desembocando en el Canal Sur. Ver figura 5, *Recorrido Canal Sur CVC*. Figura 6, *Ubicación de los lixiviados y Navarra frente al Canal Sur*. Figura 7, *Salida del Canal CVC al río Cauca*.

Como se observa en las figuras anteriores, es notoria la mancha negra proveniente del Canal Sur que desemboca en el río Cauca, evidenciando la gran contaminación diaria que se presenta por la expansión sur de la ciudad y los problemas en que se incurren más adelante en la PTAP, en donde un exceso de contaminación hace intratable el cauce del río, interrumpiendo el servicio de agua potable en la ciudad. Según el Informe Ejecutivo Univalle-Emcali 2005-2007, el paso de agua del Canal Sur-Río Cauca es de 1710 l/s, en donde se mezclan aguas residuales y aguas fluviales. Ver figura 8, *Contaminación del río cerca a la bocatoma de la planta de Puerto Mallarino*.

## 7. LA INTERACCIÓN HIDRÁULICA ENTRE EL CANAL SUR Y EL RÍO CAUCA, CLAVE PARA ENTENDER EL PROBLEMA

Al presentarse condiciones típicas con lluvias del centro de la ciudad hacia el norte, y caudal normal del Canal Sur, sin lluvias torrenciales en el sur de Cali, y el río Cauca con un caudal alto, son las condiciones necesarias para que la contaminación que llega del Canal Sur se diluya, como se puede observar a continuación:

Figura 2. Interacción hidráulica con caudal alto.



Fuente: Tomado de la Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013

No obstante, el empuje de las aguas fluviales derivado de un fuerte aguacero en el sur de Cali llevando las aguas residuales y los sedimentos en el Canal Sur hasta el río Cauca, causa una mancha negra intratable para la PTAP Puerto Mallarino. Ver figura 9, *Contaminación Canal Sur CVC*.

Figura 3. Interacción hidráulica con caudal bajo.



Fuente: Tomado de la Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013

## 8. EL RIO CAÑAVERALEJO Y LA CONTAMINACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El Río Cañaverlejo es uno de los principales afluentes de la ciudad de Santiago de Cali, siendo parte del grupo de siete ríos del municipio. Su nacimiento parte de la cordillera occidental en proximidades del Alto del Faro, el cual se encuentra a unos 1800 mts sobre el nivel del mar y desemboca en el Canal CVC sur. Dado el crecimiento poblacional en el municipio se han presentado cambios importantes en este río. Entre estos, se ha evidenciado el aumento de descargas de aguas residuales, el deterioro significativo de la calidad del agua, sus riveras se encuentran expuestas a diferentes factores de riesgo como inundaciones y deslizamientos acentuados por factores climáticos, sin olvidar la deforestación que se presenta en la zona. Es decir, que toda la

contaminación que se genera durante el cauce del río recae sobre el Canal CVC Sur, agravando el problema que se ha venido tratando.

Agravando un poco más la situación, en la parte norte del río Cauca, la planta de Cañaveralejo (PTAR), expulsa alrededor de 50 toneladas diarias de material orgánico ( $\text{DBO}_5$ ) (Efluente de la primera fase de tratamiento), según datos del 9 de julio del 2012, del proyecto. Es de recodar que el tratamiento que se realiza a las aguas residuales en la ciudad en esta planta es fase I, es decir que solo trata el 30% de la cantidad de agua total que ha esta le ingresa, desembocando en el río el resto de agua contaminada, que representa el 70% aproximadamente del agua residual originada en el sector urbano y rural. Esto, evidentemente, es un problema ambiental que es de consideración. Aunque se implemente la fase II, no se solucionaría la gran problemática que se ha venido planteando, pues el problema mas grande reside desde el Canal Sur, del cual nunca se ha pensando en un proyecto de gran magnitud para contral el paso de material organico por esto, y las deforestación que se presentan en el río Palo que se encuentra ubicado al sur del Valle del Cauca, y que trae como consecuencia problemas de intratabilidad del agua por exceso de lodo y desechos solidos. Ver figura 10, *efluente de la primera fase de la PTAR*.

## 9. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO – HACIA UNA VISIÓN DE LA PLANTA DE BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Conociendo los problemas que se vienen presentando en la ciudad de Santiago de Cali, y sus alrededores, es de reconocer que las dificultades que se vienen presentando en el servicio de agua en Cali es un tema que se debe abordar con responsabilidad y una buena planeación de lo que realmente se quiere solucionar, es decir, se debe atacar los problemas críticos, no solamente la implementación de una segunda Fase como tratamiento de aguas residuales. Es por eso que el proyecto de una planta de Biorremediación de Aguas Residuales regional se presenta como una alternativa integradora de los problemas citados.

### 9.1 SEPARACIÓN TEMPRANA DE LAS AGUAS RESIDUALES Y LAS AGUAS LLUVIAS

Para implementar el proyecto, se debe tener en cuenta ciertos aspectos a la hora de mencionar el funcionamiento y mecanismos que se pretenden utilizar en el proceso del tratamiento de las aguas residuales. Uno de ellos es la separación temprana de las aguas residuales y las aguas lluvias. Como lo menciona Douglas (2013), “Uno de los conceptos de fondo de esta propuesta es el de separar, lo más temprano posible, las aguas residuales de las aguas lluvias para que los ríos y los canales fluviales estén listos y libres para recibir las aguas de los fuertes aguaceros que serán constantes en el futuro y, al mismo tiempo, facilitar el tratamiento de las aguas residuales sin las complicaciones dadas por los caudales muy variables del Canal Sur y otros”. Es decir, que con menos caudal en

promedio, pero con la misma carga orgánica, esta propuesta es física y económicamente viable, si partimos de la aplicabilidad de la condición de separación temprana de aguas fluviales y residuales. Ver figura 11, *Mirada Previa a la implementación de tuberías para la transición de aguas residuales en el perímetro urbano*.

Como se observa, las tuberías están ubicadas en puntos estratégicos en la ciudad, dado que los bombeos deben centrarse en las partes donde se presenta una mayor cantidad de aguas residuales. El primer bombeo se presenta en el Canal Sur con Autopista Sur, la cual debe tener una desarenadora dado los residuos sólidos presentes. El segundo bombeo se ubicaría en río Meléndez con Autopista Simón Bolívar. Estos bombeos deben de estar conectados a tuberías que se encuentren instaladas por encima de las riberas del Canal Sur, hasta el río Cauca. Ver figura 12, *ubicación de las estaciones de bombeo*.

La Instalación de las tuberías de aguas residuales sobre las riberas del canal incrementaría la altura de los bordes de este, evitando futuras inundaciones. Se espera que la implementación de las tuberías y la remoción y colocación de la tierra no conlleve a costos muy altos. Además de esto, deben de existir dos estaciones de bombeo que estén antes de tomar el Canal Sur, pero estas funcionarían por gravedad en dos sectores que en los últimos años han presentado una amplia expansión urbana-rural, y con ello contaminación excesiva, como lo es Polvorines y la Sirena. Ver figura 13, *Mecanismos para la implementación de tuberías de transmisión de aguas residuales*.

Para llevar a cabo el correcto funcionamiento de las tuberías de transmisión de aguas residuales, se debe realizar una recuperación del Canal Sur y Los Caños de Cali. La remoción de las aguas residuales de los caños y del Canal Sur, puede representar una ventaja dado que durante los periodos más secos la limpieza del fondo y la reparación de las losas se facilita enormemente, es decir cuando el canal está libre de la mayoría de las aguas. Este permite un mayor acceso de la maquinaria pesada al fondo del Canal. Esto conlleva a que, con los canales limpios, se llega a un mejor funcionamiento dado las menos inundaciones que se puedan presentar. Laing (2013), resalta que puede implementarse cercas paisajísticas a los dos lados del Canal Sur, siendo esenciales en áreas donde hay vertimientos de sólidos y cerca de la Galería Santa Helena y otros.

## 9.2 BENEFICIOS SOCIALES

Se pueden identificar un conjunto de beneficios sociales que sustentan o dan valor agregado a la implementación del proyecto de la planta de biorremediación; la identificación de estos beneficios, dado las limitaciones de este trabajo, no se estimarán. En base al trabajo de Godínez (2007), podemos nombrar los siguientes:

- a) Disminución de costos de salud: Los cuales se pueden identificar como el ahorro en costo por atención de enfermedades que se asocian al contacto con aguas residuales, presentes en la zona, y los cuales se evitarían con la implementación del proyecto.
- b) Incremento en el valor de los predios: Dado que se retiran de forma organizada y estructurada las aguas residuales de ciertas zonas de la ciudad, los lugares donde antes

existían problemas de salubridad por aguas residuales tendrían un incremento en el valor de los predios.

- c) Incremento en el excedente agrícola: Dado el tratamiento de las aguas residuales, los agricultores pueden llegar a ser partícipes de este sistema con unos filtrajes previos, para así reutilizar el agua que necesitan, sin contaminar el río o las aguas subterráneas, y mejorando sus excedentes de producción.
- d) Aprovechamiento del agua en la industria: Igual que el caso de los agricultores, pueden ser tratados ciertos tipos de aguas residuales de las industrias.
- e) Mejoramiento del medio ambiente: El impacto ambiental al reducir el mal manejo de las aguas residuales en la ciudad, la región y la descontaminación del río Cauca es importante, y debe ser uno de los objetivos principales de este proyecto, dado la conservación del medio ambiente. Además de la solución de otros problemas como desbordes de las aguas de los canales residuales o aguas lluvias por escombros y desechos.

### 9.3 COSTOS SOCIALES

Al igual que los beneficios sociales, también es posible identificar los costos sociales, el cual pueden ser los siguientes:

- a) Inversión: Que son los recursos requeridos para la construcción, el equipamiento y trabajos complementarios para la elaboración y funcionamiento de la planta regional de biorremediación de aguas residuales.
- b) Operación y mantenimiento: Se identifican como los recursos requeridos para el tratamiento de las aguas residuales, al igual que el mantenimiento de las lagunas y los humedales necesarios.
- c) Aprovechamiento del agua tratada: Asociados a los recursos requeridos para el utilizar el agua tratada en diferentes fines como la agricultura, la industria, la reutilización en el plano urbanístico o rural, y la recuperación ambiental del río Cauca.

La identificación de los costos del aprovechamiento del agua tratada, dado las limitaciones de este trabajo, no se estimarán.

### 9.4 TRES ETAPAS DE BIORREMEDIACIÓN

La planta regional de biorremediación de aguas residuales consta de tres pasos principales, siendo las siguientes:

1. Tratamiento Primario: Lagunas Anaeróbicas con 60% remoción orgánica (Primera etapa)
2. Laguna Facultativa (Primera etapa)
3. Humedales (segunda etapa): Esta etapa a su vez contiene tres etapas, las cuales son:
  - a) Humedal Construido con 50% remoción con Sauces
  - b) Humedal Construido con Caña Brava 40%

c) Humedales de Juncos y Buchones 30% remoción

Buscando llegar a un punto donde el agua efluente tengo aproximadamente el 2% del contenido contaminante del afluente, al final del procesos.

## 10. PROCEDIMIENTO Y MECANISMOS IMPLEMENTADOS EN EL PROYECTO

### 10.1 EL PRIMER PASO: TRATAMIENTO PRIMARIO

Como primera medida, se debe realizar un tratamiento primario de las aguas residuales regionales en lagunas anaeróbicas. Esto cumple la función de reducir significativamente los materiales orgánicos sólidos y los contaminantes orgánicos solubles de las aguas residuales de la región. Las **Lagunas Anaeróbicas** son muy rentables en las tierras de bajo costo, las cuales requieren más tierra que otras alternativas. Estas usan menos energía que los otros métodos de tratamiento. Estas, generalmente son simple de operar y mantener, manejando flujos intermitentes. Son muy eficaces en la eliminación de organismos. Son eficientes en climas tropicales cálidos como lo es el Valle del Cauca. No obstante, el mantenimiento es crítico para el control de zancudos y olores, no son efectivas en la remoción de metales pesados y nutrientes. También, el afluente en ocasiones contiene algas y requiere control. En ciertos espacios y condiciones, los olores pueden molestar durante floraciones de algas. La propuesta que se plantea para la planta de biorremediación de aguas residuales costa de lagunas anaeróbicas de 4.5 metros de profundidad con una carga potencial de 3000 kg/ha/día de DBO<sub>5</sub>.

Las lagunas anaeróbicas convencionales en el trópico son muy eficientes con aproximadamente 60% remoción de DBO<sub>5</sub> durante todo el año con aguas residuales entrando con DBO<sub>5</sub> < 300 mg/L, pH de agua > 6,5, temperatura del agua de 24 ° C y con resistencia hidráulica de aguas residuales (TRH) durante 24 horas. Las lagunas no son eficientes con la remoción de nutrientes o contaminantes químicos. Olores y zancudos son problemas potenciales. El costo del mantenimiento es muy bajo. (Desing Manual UNEP Denmark).

Se debe tener en cuenta el estudio del suelo y si este tiene condiciones necesarias para llevar a cabo las lagunas planteadas. Según estudios del suelo realizados por Emcali, para la nueva laguna de reserva en Puerto Mallarino, los suelos de las riberas del río Cauca son bastante impermeables por razón del alto contenido de arcilla. Es decir, que la tierra arcillosa compacta es un excelente sustrato impermeable de muy bajo costo. Para el caso de las lagunas facultativas, lo que se logra obtener es un efluente con la mayor calidad posible, es decir, en la cual se haya alcanzado una elevada estabilización de la materia orgánica y una reducción en el contenido de nutrientes y bacterias coliformes (bacterias con características similares que dada su bioquímica sirven de indicadores de contaminación del agua).

## 10.2 SEGUNDO PASO: LAGUNA FACULTATIVA – TRATAMIENTO PRIMARIO

En la laguna de facultativa se lleva a cabo la estabilización de las aguas residuales mediante una combinación de bacterias (facultativas) anaerobias y aerobias. En el estanque facultativo existen tres zonas: 1. Una zona superficial en la que existen bacterias aerobias y algas en una relación simbiótica, es decir, una estrecha relación biológica entre dos organismos distintos que se benefician o no para cada uno de ellos. 2. Una zona inferior anaerobia en la que se descomponen activamente los sólidos acumulados por acción de las bacterias anaerobias. 3. Una zona intermedia, que es parcialmente aerobia y anaerobia, en la que la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas. Los estanques de estabilización facultativos son estanques excavados en el terreno, los cuales se alimentan con agua residual; Peralta, et al (1999). Gracias a estas lagunas, se espera remover entre el 31% y el 38% del material residual de las aguas.

## 10.3 TERCER PASO: TRATAMIENTO SECUNDARIO (SAUCES, CAÑA BRAVA, JUNCOS Y BUCHONES) - HUMEDALES.

La función del tratamiento secundario se centra en reducir de manera significativa los materiales orgánicos sólidos y solubles de las aguas residuales y especialmente el nitrógeno y fósforo, de las aguas residuales regionales. Para ello, se plantea **Humedales** construidos tipo FSLH (Flujo Superficial libre horizontal) sembrados con árboles, u otras plantas.

Existen dos tipos de humedales de referencias que se deben tener a consideración para el proyecto, el de Flujo Superficial Libre Horizontal y Flujos Sub-Superficial horizontal confinados. Ver figura 14, *tipos de flujos*.

Para el tipo de suelo existente en la ciudad, en el que se utilizaría en el proyecto, es conveniente el sistema FSLH (Flujo Superficial Libre Horizontal), dado que necesito un sustrato de tierra arcillo compactada.

El Flujo Superficial Libre Horizontal (FSLH), dentro de sus ventajas, es que es un sistema económico para instalar donde la tierra no es muy costosa y donde los suelos son arcillosos, especialmente con arcilla de monmorillonita. Los olores que se presentan con aguas secundarias no son considerables, siendo los zancudos controlados por la macrofauna (es decir, sapos, otros tipos de insectos, etc.). Es posible sembrar árboles y otras especies acuáticas con muy amplio rango de especies que se encuentran adaptadas a humedales, cada una con sus ventajas en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos específicos. No obstante, la desventaja de usarlo es el requerimiento de un área más grande de tierras. Por ello, es necesario adquirir cierta cantidad de

hectáreas para tener un funcionamiento óptimo de la plata de biorremediación y posteriores ampliaciones y mejoras en el futuro.

Los humedales construidos tipos FSLH son muy eficientes en la remoción de contaminantes y muy económicos donde la tierra es muy barata. Se puede observar dicha eficiencia en promedios de 85 sistemas operacionales con estos humedales, la mayoría son primarios o secundarios principalmente en zonas subtropicales y templadas de Australia, Canadá, China, Holanda, Nueva Zelandia, Polonia, Suecia y U.S.A. Ver figura 15, *Eficiencia de remoción de materia organica*.

Para este tipo de humedales se puede implementar cierto tipo de vegetación para mejorar su eficiente. Se plantea un sistema FSLH dominado por árboles de *Malaleuca quinquervia* y *M. alternifolia* en el subtrópico Australiano. Tomando los datos del artículo, “Humedales Construidos con Bosques de Árboles” (Bolton y Greenway, 1999), observamos la eficiencia de la utilización de este sistema respecto a la descontaminación en aguas residuales:

Afluente: Agua residual doméstica primaria con DBO<sub>5</sub>, con 60 mg/l

|           |                                |         |
|-----------|--------------------------------|---------|
| Efluente: | Remoción de DBO <sub>5</sub>   | 98%     |
|           | Remoción de SST                | 99%     |
|           | Remoción de Nitrógeno          | 54%-84% |
|           | Remoción de Coliformes Fecales | 99%     |

#### 10.4 SALINIZACIÓN DE LAS TIERRAS DEL VALLE DEL RIO CAUCA

La zona salinizada cerca de Palmaseca, Palmira, es aproximadamente de 800 hectáreas. Actualmente se encuentra parcialmente colonizada con arbusto adaptado a suelos salinos/sódicos. El Uso excesivo de agua en sistemas de riego por gravedad es uno de los factores responsables para la salinización. Hay indicios de que el área plana salinizada en 2013 es mayor a 85,000 hectáreas en el Valle del Cauca Geográfico. Estas tierras son improductivas, de bajo costo, ayudando a la reducción de costos en que se debe incurrir si se realiza el proyecto, las cuales son las necesarias para el tipo de tratamiento secundario que se implementaría. Además de ello, los vientos del norte o noreste tienden hacia el sur el 90% del tiempo, y resaltando que hay pocas unidades de vivienda hacia esta dirección, es un buen elemento para depurar los posibles y pocos olores que puedan resultar del proceso de tratamiento secundario.

El área comprendida que se utilizaría está limitada por Roza, Palmaseca, Yumbo y Rio Palmira, ver figura 16, suelos necesarios para la implementación de la PTARR.

Para Douglas, el promedio por hectárea de las tierras agrícolas del valle geográfico plano en 2013 es del orden de entre \$35 a \$45 millones de pesos, pero el precio real de estas tierras salinizadas en consideración con la muy baja o nula productividad es el orden máximo de \$15 millones por hectáreas. Es decir que el costo para las 800 hectáreas sería aproximadamente de \$7 millones USD.

#### 10.4.1 La importancia de los Sauces

Los humedales construidos sembrados con árboles de rápido crecimiento como los sauces dan unas alternativas muy importantes para el tratamiento de aguas residuales y lixiviados. La capacidad de remoción, especialmente en el caso de nitrógeno es muy alta, y el ecosistema promueve la denitrificación en la zona radicular. Tiene una absorción altamente selectiva de metales pesados, especialmente cadmio. Además, los Sauces tienen una alta tasa de evapotranspiración para facilitar cargas pesadas, por ejemplo, de lixiviados de un basurero y en muchos casos los filtros de vegetación son más rentables que los métodos de tratamiento convencionales (Par Aronsson y Kurtg Perttu, 2001).

Según Kuzovkina y Quigle (2005), los sauces tienen muchas ventajas al ser utilizados en sistemas diseñados con humedales. Por ejemplo, los Sauces presentan un crecimiento muy eficiente con altas conversión de radiación solar, dada las raíces amplias y fibrosas presentan altas tasas de evapotranspiración. Presenta absorción eficiente de nutrientes, especialmente nitrógeno, capacidad para facilitar la denitrificación en la zona radicular, tolerancia a suelos saturados en la zona radicular (es decir alrededor del sauce), es resistente y acumula altos niveles de metales Cr, Cd, Cu, Zn, Ni, Pb y Fe. Además, algunas especies de sauces son tolerantes a condiciones de suelos salinos, entre otras ventajas. Actualmente en el Valle del Cauca, se encuentra el Sauce Llorón, el cual es nativo de la región. No obstante, estudios previos demuestran que el Sauce de la India son las tolerantes a suelo y aguas salinizadas. Además de los Sauces, la Caña Brava es resistente a la salinidad y es utilizada para la biorremediación de aguas salinas, la cual se usarían en la etapa tres, es decir, los humedales construidos en este tipo de vegetación.

#### 10.4.2 El tratamiento con Juncos y Buchones

El tratamiento humedales abiertas de Polishing de 100 cm de profundidad sembradas con plantas junco y buchón. Dicha etapa dejaría aguas tratadas que entrarían al efluente del río Cauca con un riesgo menos de 5 mg por litro de  $\text{DBO}_5$  y casi cero de SST. Frente a la presencia de zancudos u otros insectos, se puede implementar una población controlada de sapos y anfibios o animales semejantes. Se debe tener en cuenta que las lagunas anaeróbicas funcionan en condiciones favorables para el desarrollo de bacterias metanogénicas con rango óptimo entre 25°C a 40 °C. La actividad anaeróbica disminuye rápidamente a temperaturas por debajo de 15° C. Los humedales con la sombra de árboles en el valle tienen temperaturas estimadas de aguas residuales entre 22 ° C y 23° C, siendo la temperatura promedio ambiental de Palmaseca entre 24° C y 25° C 950 msnm

(metros sobre el nivel del mar), siendo una condición casi perfecta para una combinación de sistemas eficientes de biorremedacción anaeróbicas y aeróbicas.

## 11. ALGUNOS DETALLES DE CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Se debe considerar que Douglas Laing divide el tratamiento de las aguas residuales en cuatro partes: primario, secundario, terciario y cuaternario. No obstante se redefinió el tratamiento en solo tres partes, siendo el tratamiento primario las lagunas anaerobias, el tratamiento secundario las lagunas facultativas, y el terciario (que incluiría el tratamiento secundario, terciario y cuaternario ilustrados en la siguiente imagen realizada por Laing (2013)), corresponde al humedal. Ver figura 17, *ilustración de la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales*.

El tratamiento primario consta de una laguna anaeróbica de 4.5 metros de profundidad, de donde existirían alrededor de 250 hectáreas disponibles para este tratamiento de las 800 hectáreas requeridas; inicialmente se necesitarías alrededor de 150 hectáreas calculadas en el año 2013. Se debe también incluir la laguna facultativa, la cual tendría aproximadamente un área de 217.615 mts<sup>2</sup>. Existiera una zona periférica de amortiguación sembrada con árboles tolerantes de suelos salinos en 100 hectáreas. El tratamiento secundario estaría comprendido por humedales construidos tipo FSLH de 25 cm sembrados con sauces tolerantes de sal en aproximadamente 150 hectáreas. El tratamiento terciario, que a su vez es una subdivisión del secundario, constaría de humedales construidos de 30 cm tipo FSLH, sembrados con Caña Brava en aproximadamente 100 hectáreas. La tratamiento cuaternario, subtratamiento del secundario, constaría de lagunas de 1 metro de profundidad de polishing con macrofitos, especialmente los llamadas Juncos, como Typha en aproximadamente 150 hectáreas.

### 11.1 TRANSPORTE DE AGUAS RESIDUALES POR TUBERÍAS

La construcción de la planta de biorremediación de aguas residuales brinda la posibilidad de que se puedan tratar aguas residuales procedentes de municipios cercanos a la ciudad de Santiago de Cali por medio de tuberías por gravedad, siendo los costos de bombeo reducidos por la existencia de pendientes a lo largo de la geografía. Cali y el Canal Sur se encuentra a 955 y 958 metros sobre el nivel del mar, la PTAR a 953 metros, el municipio de Yumbo a 960 metros, Roza a 966 metros, Palmira a 1000 metros, Candelaria a 965 metros, Jamundí a 968 metros, estando la PTAR Regional (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – Biorremediación) a 950 metros sobre el nivel del mar aproximadamente, es decir, la de menor altura entre todos los lugares georeferenciados. Siendo la reconstrucción de los Jarillones de Cali, como lo menciona Douglas, una oportunidad perfecta para

instalar la tubería desde el Canal Sur. De esta forma se traen aguas residuales de sitios críticos en la región que pueden tratarse de forma eficiente con la planta de biorremediación.

#### 11.1.1 ESTIMACIONES PROVISIONALES DE LAS NUEVAS TUBERÍAS REQUERIDAS PARA LAS AGUAS RESIDUALES DE CALI

Dada unas estimaciones preliminares, existen diferentes conexiones que implicarían una cantidad específica de tuberías, en relación a lo largo y el diámetro.

Tabla 1. Estimaciones provisionales de distancia de las tuberías para el municipio de Santiago de Cali – 41,7 Kilómetros.

| Conexiones entre                                                                                                                                                                                                                                                                       | Largo Km | Diámetro Cm | Alturas msnm  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------|---------------|
| Efluente de la PTAR Cañaveralejo bombeada directamente hasta la PTARR Palmaseca (Bajo el puente nuevo de Pase del Comercio, la recta Palmira y la carretera a Rozo)                                                                                                                    | 12,5     | 180         | 953 hasta 950 |
| Tuberías instalas encima del nuevo jarillón del río Cauca e interconectando las siguientes estaciones de bombeo. EB Canal sur (2 bombas nuevas requeridas), EB Puerto Mallarino (bombeo existente), EB Florália (bombeo existente) hasta la EB Puente del Comercio (bombeo existente). | 19       | 90          | 956 hasta 952 |
| EB Puente del Comercio hasta PTARR Palmaseca (bajo el puente nuevo del Paseo del Comercio) vía la recta Palmira y la carretera a Rozo (con AR de Palmira conectadas)                                                                                                                   | 10,2     | 180         | 952 hasta 950 |

Fuente: Tomado de la Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013

Se necesitan aproximadamente 100 kilómetros de tuberías, teniendo en cuenta las conexiones necesarias dentro del municipio de Santiago de Cali (41,7 km) y la conexión entre los demás municipios, el cual se estiman en 58,3 kilómetros. Estas a su vez deben tener diferentes dimensiones dependiente del caudal de aguas residuales promedios en cada ciudad o pueblo, y el tipo de suelo en el cual se van a instalar, entre otras variables críticas.

El transporte de las aguas residuales, durante su trayecto en las tuberías a instalar, se da en su mayoría por efectos de gravedad reduciendo el uso de bombeo y utilización de energía, disminuyendo los costó de mantenimiento y operación gracias a que en todos los municipios beneficiados tiene una altura mayor a donde se ubicaría la PTARR – zona Palmaseca. Ver figura 18, *altura municipios*.

## 12. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE PROYECTO

Para este proyecto, se tomó como metodología el Análisis Costo-Eficiencia (ACE). Dado que es complejo valorar monetariamente los beneficios del proyecto de la planta regional de Biorremediación, se deben plantear metas, productos u objetivo seleccionando una técnica que sea dual al proceso de maximización de los beneficios, como lo es el ACE (Castro et al, 2008).

### 12.1 ANÁLISIS COSTO-EFICIENCIA (ACE)

Existen proyectos donde expresar sus beneficios en términos monetarios es muy complejo, por ello el análisis costo-beneficio (ACB) puede no ser apropiado como método a seguir. Dado esto, se utilizan métodos que sean duales al proceso de maximización de los beneficios, como lo son métodos directos e indirectos, el análisis de mínimo costo y los análisis costo-efectividad y costo-efectividad ponderado. Existen dos técnicas principales para la evaluación de proyectos cuando los beneficios son de fácil cuantificación en términos monetarios: el análisis costo-eficiencia y el análisis costos-eficiencia ponderado. La diferencia radica en la medición en que se quiera realizar los beneficios. Por ejemplo, se utiliza el análisis costos-eficiencia si los beneficios se miden en unidades monetarias donde se busca un solo objetivo o meta, como el número de niños escolarizados. Para el caso del análisis costos-eficiencia ponderado, se utiliza cuando el beneficio del proyecto consisten en varias metas o dimensiones (disminución de mortalidad y aumento de natalidad), siendo necesario ponderar y reducir a una sola medida las dimensiones de los beneficios, (Castro, 2008).

Se debe conocer que el costo-eficiencia es apropiado si el proyecto tiene una sola meta que no sea mensurable en términos monetarios. Para el caso del costo-eficiencia ponderado, se implementa cuando existen múltiples logros o metas a alcanzar que no sean de fácil cuantificaciones en términos monetarios, tomando por ejemplo la implementación de tecnologías para la cobertura y calidad del agua, o en el caso del proyecto de la planta de biorremediación realizar un tratamiento adecuado de las aguas residuales, al igual que solucionar problemas de colmatación de aguas contaminadas en sitios críticos, entre otros beneficios indirectos como la implementación de futuros proyectos para la descontaminación del río Cauca a lo largo de su cauce en del departamento del Valle. Se debe entonces reducir las metas en una sola para este trabajo, y es el porcentaje de remoción de carga orgánica en las aguas residuales en relación a la población beneficiada, y el mínimo valor presente de los costos, para poder utilizar el análisis costos – eficiencia simple, o sin ponderación.

Dado que los beneficios son de difícil medición monetaria, la minimización de los costos, dado una meta o un nivel de producción, se convierte en una alternativa para garantizar la optimización de los recursos invertidos. Para los proyectos de inversión que presenten dificultades en la medición de los beneficios, se establece un principio fundamental sobre el que descansa el análisis costo-eficiencia (ACE): dado un limitado monto de recursos, deberían asignárseles de forma tal que permitan

obtener el mayor número de resultados o beneficios al menor costo posible con unas consideraciones tecnológicas dadas, (Castro, 2008).

## 12.2 COSTOS UNITARIOS DENTRO DEL ACE

El análisis costo-eficiencia desde los costos unitarios es apropiado si se desea comparar la eficiencia de las inversiones en los proyectos sociales y de infraestructura. Es relativamente simple calcular los costos y las unidades producidas de un proyecto estable, dado que ya se ha incurrido en todos los costos de capital y que los costos recurrentes y número de unidades son bastante estables. Sin embargo, alcanzar costos unitarios para nuevos componentes es un poco más difícil, dado que, por ejemplo, en educación es típico que los costos del capital sean superiores en los años iniciales y las matrículas, así como el número de graduados, son superiores una vez el proyecto se encuentran trabajando a plena capacidad o cuando la demanda es creciente; por consiguiente, es necesario comparar los costos y beneficios (o los productos) que ocurren en diferentes puntos del tiempo, (Castro et al, 2008). Las herramientas que podemos utilizar en el análisis económico pueden ser útiles en estos casos, dado que es posible descontar los costos y realizar comparaciones en relación a los beneficios en un solo momento del tiempo; siendo la mayoría de los indicadores costo-eficiencia, indicadores de costos unitarios.

## 12.3 ASPECTOS OPERATIVOS DEL ANÁLISIS COSTO-EFICIENCIA

Las diversas técnicas de evaluación que existen comparten algunos pasos comunes, como lo es la identificación del problema y las alternativas, seleccionar el tipo óptimo de análisis y decidir la ruta apropiada de acción. Como menciona Castro et al (2008), con una modificación del orden entre la estimación de los costos y la eficiencia (donde originalmente debe ser primero la eficiencia), el ACE implica:

- Definir objetivos: ¿Qué queremos hacer?
- Estructurar alternativas: ¿Cuáles son las formas de hacerlo?
- Estimar costos: ¿Qué perdemos?
- Calcular eficiencia: ¿Qué ganamos?
- Escoger criterios: ¿Cuál alternativa es mejor?

En donde lo anteriores nos lleva a definir y delimitar categorías que soporten el análisis costo-eficiencia en la toma de decisiones.

Existen diferentes expresiones que van en función de las características de los beneficios de cada proyecto en particular. En el caso de que los beneficios sean iguales, se elige la alternativa que minimice el valor presente de los costos. En el caso de que las diferentes alternativas generan beneficios diferentes y éstas difieren únicamente por el “volumen del beneficio” que generan, podemos utilizar en criterio el costo por unidad de beneficio producida, o costos por unidad de servicios, o también el costo mínimo por beneficiario (C/B). Dado que los proyectos de inversión involucran corrientes de beneficios y costos a través del tiempo, es común descontar el valor de estos flujos con una tasa de descuento (r), que puede ser privada o económica (Tasa Social de Descuento), que refleja los costos de oportunidad del recurso o flujo en el tiempo, Castro et al (2008).

Uno de los indicadores que pueden considerarse en el análisis de proyectos en relación a la eficiencia es el mínimo valor presente del costo (C) por producto alcanzado (P) en la vida útil del proyecto (n), del cual se determina el Índice de Costo - Efectividad:

$$\frac{C}{P} = \frac{\text{Min}(VPC)}{\text{Número de productos}} = \frac{\left[ \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+r)^n} \right]}{\text{Número de productos}}$$

Donde el VPC es el valor presente de los costos.

En el caso de que se utilice el indicador como el mínimo valor presente del costo (C) por beneficiario (B) en la vida útil del proyecto (n):

$$\frac{C}{B} = \frac{\text{Min}(VPC)}{\text{Número de beneficiarios}} = \frac{\left[ \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+r)^n} \right]}{\text{Número de beneficiarios}}$$

Otro indicador utilizado es el costo anual equivalente (CAE), el cual calcula los valores anualizados de los costos de inversión y operación y logra encontrar un monto fijo para cada período de la vida útil del proyecto. A diferencia de otros indicadores, este permite encontrar un único costo igual en cada periodo y compararlo con los productos o resultados del periodo. Una expresión que se utiliza mucho para el mínimo CAE por producto (P) o beneficiario (B) es el valor presente de los costos (VPC) ponderado por un factor de diferenciación  $\left\{ \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^{n-1}} \right\}$ :

$$\frac{CAE}{B} = \frac{CAE}{\text{Número de beneficiarios (o número de productos)}}$$

$$\frac{CAE}{B} = \frac{VPC \left\{ \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^{n-1}} \right\}}{\text{Número de beneficiarios (o número de productos)}}$$

Es decir, el uso de indicadores de costo-eficiencia depende de la interpretación apropiada y el producto o impacto que se desea estudiar o analizar.

Los indicadores que se estructuran a partir del ACE son indicadores denominados costo-eficiencia incremental, la cual tiene su razón de ser por la comparación de la situación sin y con proyecto. Un indicador costo-eficiencia incremental (ICEI) se define como la relación entre los costos incrementales (en valor presente o como un costo anual equivalente,  $\Delta C$ ) y la cantidad de producto adicional o número de beneficiarios adicionales ( $\Delta P$ ):

$$ICEI = \frac{\Delta C}{\Delta P}$$

Cuando se dificulta la estimación del valor incremental de los costos, es normal en el análisis económico asumir el supuesto de que la relación incremental es igual a la relación media. Es decir, utilizar como una proxy del indicador costo-eficiencia promedio, por ejemplo, el CAE por producto (P):

$$ICEP = \frac{CAE}{P}$$

Es decir, este indicador nos ayuda a comparar los costos y efectos entendidos como efectividad de una intervención frente a los costos y efectos de otra intervención, o proyecto, en los cuales se expresen en las mismas unidades. Dicho indicador puede expresarse también de la siguiente forma:

$$ICEI = \frac{C_A - C_B}{P_A - P_B}$$

Donde  $C_A$  y  $C_B$  son los costos, y  $P_A$  y  $P_B$  son los resultados o productos de la opción, proyecto o alternativa A y B.

### 13. EVALUACIÓN DEL PROYECTO – ESTUDIOS DE PRE-FACTIBILIDAD

Al conocer en detalle el concepto del proyecto, el cual se ha planteado como una respuesta alternativa a la problemática de agua potable y residual de la región, se debe realizar una evaluación que determine la viabilidad de este en comparación con otras alternativas de solución como lo es la Fase II de la Planta de Tratamiento de Cañaveralejo. Para ello, se debe considerar los costos asociados a la implementación de la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales, los cuales incluyen tuberías necesarias, materiales, compra de predios, entre otros factores.

#### 13.1 OBJETIVO DE EVALUACIÓN

Como objetivo por el cual se realizar la evaluación es identificar que la alternativa del proyecto planteado, es decir, la planta regional de biorremediación de aguas residuales es conveniente desde diferentes puntos de vista. EL argumento más fuerte, dado las limitaciones de este trabajo, son los menores costos que se logran con este proyecto, frente a la alternativa de la construcción de la fase II de la PTAR. Dentro de la alternativa de la planta de biorremediación, tenemos dos alternativas para remediación de aguas residuales las cuales han de ser evaluadas desde un enfoque de costos y efectividad.

### 13.2 ESTRUCTURACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRTAMIENTO DENTRO DEL PROYECTO DE LA PLANTA DE BIORREMEDIACIÓN

Dentro del proyecto de la Planta regional de Biorremediación de aguas residuales, existen dos alternativas de tratamiento de las aguas residuales según su origen. Dado esto, los costos en que se incurre varían, al igual que la efectividad del tratamiento. Dichas alternativas fueron presentadas por Andrés Toro, Ingeniero de la Universidad del Valle, perteneciente al Grupo de Saneamiento Ambiental del Instituto CINARA.

#### 13.2.1 Especificaciones técnicas

La primera opción, o alternativa de tratamiento A, corresponde a tratar las aguas residuales de Candelaria, Cali, Jamundí, Palmira, Yumbo y Villa Gorgona haciendo uso de las lagunas anaeróbicas. Posteriormente pasan a las lagunas facultativas, seguidas de los humedales superficiales, desembocando finalmente en el Río Cauca. Ver figura 19, *alternativa de tratamiento A*.

Como se observa en la figura 14, para un  $\text{DBO}_5$  de  $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  de origen en las aguas residuales, al ser tratadas en las lagunas anaeróbicas, se obtiene una reducción de la contaminación o turbiedad del agua, alcanzando un  $\text{DBO}_5$  de  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , es decir, una reducción del 58.33%.

La opción dos , o alternativa de tratamiento B, corresponde a complementar el tratamiento de las aguas residuales de Cali, es decir tomar el tratamiento primario que se realiza en la PTAR de Cañaveral, incluyendo el Canal CVC Sur, y un tratamiento completo de las aguas residuales de Jamundí, Candelaria, Villar Gorgona, Palmira y Yumbo. Ver figura 20, *alternativa de tratamiento B*.

A diferencia de la anterior opción, se tiene una carga de  $\text{DBO}_5$  de  $256 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , correspondientes a las aguas residuales procedentes de Floraria, Palmira, Yumbo, Candelaria y Villa Gorgona. Al pasar por las lagunas anaeróbicas, se tendría un efluente de  $\text{DBO}_5$  de  $82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , en donde se juntarían las aguas previamente tratadas en la PTAR de Cañaveral correspondientes a las aguas residuales de Cali con un  $\text{DBO}_5$  de  $103 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , para un total de  $\text{DBO}_5$  de  $101 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  al ser juntadas los dos efluentes según el porcentaje en el total de agua residual a tratar en la segunda fase. Una vez se

tratan las aguas residuales en las lagunas facultativas, se tendría un  $\text{DBO}_5$  de  $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , donde finalmente después se pasar por los húmedas superficiales, se desembocaría al Río Cauca agua trata con un  $\text{DBO}_5$  menor o igual a  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , es decir, una respuesta menos eficiente que la primera opción.

Para realizar los cálculos anteriores, se tuvieron en cuenta la determinación de caudales y concentraciones para cada una de las opciones. Al observar la tabla 17, *Caudal y carga orgánica para tratar en la alternativa A*, tenemos que el mayor caudal presente en la PTAR-C con  $6100 \text{ L/s}$ , para un total de  $8940 \text{ L/s}$ . y un  $\text{DBO}_5$  de 119 ponderado por el caudal de cada uno de la localidad de referencia.

Para el caso de la alternativa B tenemos un comportamiento similar a la opción uno, a diferencia de que se calculan los datos por grupos individuales. Siendo Palmira la que presenta un mayor nivel de  $\text{DBO}_5$  para las localidades externas al perímetro urbano y el Canal Sur con 138  $\text{DBO}_5$ . Ver tabla 18, *Caudal y carga orgánica para tratar en la alternativa B*.

### 13.2.2 Lagunas anaerobias

En cuanto al diseño técnico de las alternativas A y B, las cuales fueron presentadas por el Ingeniero Andrés Toro, se tienen diferentes características. Para la alternativa A, se presentando un caudal de entrada de  $8940 \text{ l/s}$  de agua a tratar, con un  $\text{DBO}_5$  de 120, siendo necesario ocho (8) lagunas anaeróbicas y con una profundidad de 4,5 metros. Ver figura 21, *diseño técnico de alternativa de tratamiento A*.

A diferencia de la anterior, la alternativa B presenta un caudal reducido de aguas residuales a tratar de  $8940 \text{ l/s}$  a  $900 \text{ l/s}$  en relación al nivel de entrada a la primera fase del proyecto, correspondiente al tratamiento primario en lagunas anaerobias. El número de unidades o lagunas anaerobias disminuye a cuatro (4), manteniendo el volumen de las lagunas estables a  $580 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$ , dejando los demás parámetros semejantes a los presentados en la alternativa A. Ver figura 22, *diseño técnico de alternativa de tratamiento B*.

Las dimensiones contempladas de las lagunas anaeróbicas en la alternativa A corresponde a 211 metros de largo por 105,8 metros de ancho, la cual en conjunto tienen una eficiencia del 68% remoción  $\text{DBO}_5$ , teniendo un  $\text{DBO}_5$  efluente del  $38,4 \text{ l/s}$ . Ver figura 23, *diseño laguna anaeróbica de la alternativa A*.

A diferencia de la anterior, la alternativa B presenta unas lagunas anaeróbicas con unas dimensiones de 96,8 metros de largo por 48,7 metros de ancho, las cuales presenta una eficiencia del 68% de remoción  $\text{DBO}_5$ , teniendo un  $\text{DBO}_5$  efluente del  $81,49 \text{ l/s}$ . Ver figura 24, *diseño laguna anaeróbica de la alternativa B*.

### 13.2.3 Lagunas facultativas

En relación al diseño de las lagunas facultativas, tenemos que para la alternativa A presenta un 31% de remoción mayor con un efluente de 26, a diferencia de la alternativa B con uno 38,2% de remoción, con un efluente de 62,4. Adicional a esto, la laguna facultativa necesaria para la opción uno es menor, con 807,3 metros de largo por 269,56 de ancho, frente a 945,6 metros de largo por 315,64 metros de ancho para la opción dos, es decir, resulta ser menos costos para este caso la alternativa A. Ver figura 25, *diseño laguna facultativa la alternativa A y B*.

### 13.2.4 Humedales

Para la alternativa A (1), tenemos un humedal con una temperatura de 24° C, y una remoción de carga orgánica del 43%, del agua tratada en las lagunas anaerobias y facultativas, con un tiempo de retención de la aguas antes de ser liberadas de 1,2 días, y un área necesaria de aproximadamente 180 hectáreas para la construcción del humedal. Para el caso de la alternativa B (2), la temperatura esperada de 24° C con una remoción de carga orgánica esperada del 68%, un tiempo de retención de las aguas tratadas de 2,2 días, y un área de 336 hectáreas. Ver figura 26, *diseño humedales - alternativa A y B*.

### 13.2.5 Área total necesaria para la planta

El área necesaria para la construcción de las lagunas anaeróbicas, las lagunas facultativas y los humedales corresponden a 379,24 hectáreas para la alternativa A, y 582,75 hectáreas para la alternativa B, según los cálculos realizados; sin embargo, dado que se deben dejar espacios entre las lagunas, carreteras, caminos edificaciones, se plantea un aumento el 10% del total de las áreas como factor de ajuste, necesitando la alternativa A 417,17 hectáreas y la alternativa B 641,03 hectáreas.

Tabla 2. Terreno – Hectáreas necesarias.

| Terreno - Hectáreas Necesarias - con el 10% del factor ajuste |               |               |
|---------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
| Fase                                                          | Alternativa A | Alternativa B |
| Lagunas Anaerobias                                            | 22,52         | 2,76          |
| Lagunas Facultativas                                          | 196,64        | 268,67        |
| Humedales                                                     | 198           | 370           |
| Total                                                         | 417,17        | 641,03        |

Fuente: cálculos propios.

Es evidente que el área necesaria para la alternativa A es mucho menor que para la alternativa B, aunque no es un indicador suficiente, pero si necesario, para determinar la escogencia entre las alternativas de tratamiento.

## 14. ESTIMACIÓN PROVISIONAL DE LOS COSTOS

### 14.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS COSTOS PROVISIONALES

Se tiene tres tipos de costos base para identificar, cuantificar y valorar a considerar dentro de la evaluación del proyecto:

- Costos directos de adquisición: Predios, materiales para las lagunas, humedales, tuberías, vegetación, entre otros.
- Costos de operación: Corresponden a los momentos que sean destinado a la administración y control del proyecto, es decir la operación del mismo, el cual se le aplica en algunos casos un 25% sobre el costo de cada adquisición.
- Costos de obras complementarias: Construcciones temporales necesarias para llevar a cabo la obra, además de otros componentes como senderos, mallas, entre otros.
- Costos de mantenimiento: Los cuales no se tienen estimados en este trabajo.

Para el diseño de las lagunas anaeróbicas, se debe tener en cuenta las siguientes características:

- La carga orgánica del efluente
- El caudal diario
- La constante global de eliminación de la  $DBO_5$
- La temperatura del agua
- El tiempo de retención hidráulica
- El factor de dispersión del estanque
- El área disponible para la instalación de las lagunas
- El volumen y la profundidad de operación

El diseño de las lagunas anaeróbicas debe fundamentarse en cargas volumétricas entre 0.1 y 0.4 Kg  $DBO_5/m^3$  día. Los valores alrededor de 0.1 deben ser utilizados en zonas donde la estación fría es prolongada y alrededor de 0.4 donde hay valores anuales de temperatura templados (27-30 grados), Scragg, 1995. Claramente en el caso de las lagunas que se construirán no se alcanzan valores tan altos.

### 14.2 COSTOS UNITARIOS – INVERSIÓN

Los valores que se muestran a continuación son tomados de diferentes fuentes, en especial de la lista de precios de la gobernación del Valle del Cauca, Decreto No. 0328 de 16 de abril de 2013.

Tabla 3. Costos unitarios, material y servicios.

| Costos unitarios - material y servicios        |               |                |                  |
|------------------------------------------------|---------------|----------------|------------------|
|                                                | 2013          | 2014 estimado* | Unidad de medida |
| Excavación tierra conglomerado                 | \$ 2.610,00   | \$ 2.666,90    | M3               |
| Relleno tierra seleccionada in situ 90%        | \$ 1.562,00   | \$ 1.596,05    | M3               |
| Perfilación de taludes                         | \$ 738,00     | \$ 754,09      | M2               |
| Conformación y compactación                    | \$ 126,00     | \$ 128,75      | M2               |
| Equipo de bombeo para excavación               | \$ 231.500,00 | \$ 236.546,70  | Mes              |
| Acarreo materiales campero-camioneta           | \$ 5.910,00   | \$ 6.038,84    | M3K              |
| Piedras                                        | \$ 70.000,00  | \$ 71.526,00   | M3               |
| Configuración-nivelación-terreno               | \$ 530,00     | \$ 541,55      | M2               |
| Retiro Mat. Excava. A maquina (sin transporte) | \$ 3.200,00   | \$ 3.269,76    | M3               |
| Relleno material sitio compactado 90% PM       | \$ 10.240,00  | \$ 10.463,23   | M3               |
| Geomenbrana polietileno alta densidad          | \$ 3.860,00   | \$ 3.944,15    | M2               |
| Empradización talud exterior diques            | \$ 160,00     | \$ 163,49      | M2               |
| Arcilla (Propuesto)                            | \$ 29.760,00  | \$ 30.408,77   | M3               |
| Transp. Tub HR D=33 hasta 36"                  | \$ 440,00     | \$ 449,59      | M/K              |
| Instalación TUB.PVC UM 12 RDE 26               | \$ 182.260,00 | \$ 186.233,27  | ML               |

Fuente: Gobernación del Valle del Cauca

\*Los precios están dados para el año 2013, por el cual se ha realizado un ajuste con la ICCP (Índice de Costo a la Construcción Pesada) del año 2013, que corresponde al 2.18% según el DANE, para determinar los precios estimados del año 2014.

Dado la complejidad del proyecto y los procesos técnicos que este conlleva, además de las diferencias en los materiales y actividades para la realización del mismo, se llevó a cabo las siguientes aproximaciones de costos presentadas de forma resumida en tablas, por fase o componente del proyecto, con los respectivos subcostos. Se realizaron los cálculos necesarios respecto a los volúmenes de las lagunas, humedales y taludes (estructura piramidal de los bordes), áreas a cubrir, y otros aspectos técnicos en base a las recomendaciones brindadas por los ingenieros del instituto CINARA durante el desarrollo del trabajo, investigaciones realizadas sobre temas de ingeniería que conllevaron a cálculos de autoría propia. Se debe tener en cuenta que las dimensiones de las lagunas anaerobias se modificaron ligeramente para una mayor eficiencia, dado estudios posteriores a los diseños iniciales, los cuales se ven reflejados en la estimación de los costos.

Se tuvo en cuenta una tasa de cambio del peso por dólar de \$1930,62 para los cálculos realizados. Para determinar la tasa de cambio se tomó la mediana de la serie temporal por día bursátil de la tasa de cambio desde el 1 de enero de 2014, hasta el 8 de septiembre de 2014, extraída de las series estadísticas de la TRM del Banco de la República. Ver anexo C.

### 14.3 LAGUNAS ANAERÓBICAS

Los detalles el tamaño de las lagunas, las áreas y otros aspectos técnicos se encuentran en el anexo C. Para la construcción de las lagunas se plantea realizar una excavación de 3 metros, de la cual se sacará tierra para la conformación de taludes al borde a la laguna, de 2 metros de altura. Dentro del talud se debe implementar la construcción de un núcleo, el cual evita la deformación de la laguna por la presión del agua dentro de esta. Dicho núcleo se constituye de arcilla. Se debe tener en cuenta que al compactar el material dentro del núcleo, se debe implementar más volumen de la arcilla, del volumen estimado que tendría el núcleo. Es importante resaltar dos puntos importantes, el primero corresponde a la implementación de rocas alrededor de las paredes de las lagunas para evitar procesos de corrosión, y el segundo, la implantación de una geomembrana por efectos legales, aunque no necesarios para este diseño según estudios previos, la cual eleva considerablemente los costos planteados.

Para la alternativa A se necesitan ocho (8) lagunas, para un total de 22,52 hectáreas, a diferencia de la alternativa B, la cual necesita cuatro (4) lagunas para un total de 2,76 hectáreas.

Como se puede observar en la Tabla 19, *Costos generales Lagunas Anaerobias*, para la alternativa A los costos ascienden a US\$ 7.430.790; para la alternativa A tenemos US\$ 1.592.154, que es claramente menor a la primera. No obstante aunque la alternativa B se perfila como la de menores costos, en las fases siguientes su costo asciende rápidamente frente a la alternativa A.

### 14.4 LAGUNA FACULTATIVA

Para el caso de las lagunas facultativas, se plantea para la alternativa A un total de 196.64 hectáreas, y para la alternativa B, 268,67 hectáreas. Estas lagunas también deben tener, al igual que las lagunas anaerobias, una geomembrana y un núcleo de arcilla. Aunque las áreas necesarias son mucho mayores a las lagunas anaerobias, su profundidad es menor, reduciendo de forma proporcional los costos por excavación. Además de ellos, no es necesaria la utilización de rocas en los taludes. Ver anexo C.

Como se puede observar en la Tabla 20, *Costos generales Lagunas Facultativa*, la alternativa A presenta un costo menor frente a la alternativa B, de US\$12.509.218 y US\$16.433.828 respectivamente.

## 14.5 HUMEDALES

En los humedales tenemos un área para la alternativa A de 198 hectáreas, a diferencia de la alternativa B la cual necesita 370 hectáreas. La profundidad de los humedales es de 1 metro, y costa de aproximadamente unos 5000 y 8000 sauces, entre las otras especies como los juncos y la caña brava. La estimación de esta vegetación es aproximada dado que la plantación de pocas semillas con el tiempo torna rápidamente un entorno a humedal muy poblado. Ver anexo C.

Como se observar en la Tabla 21, *Costos generales Humedales*, la alternativa A tiene un costo de US\$10.070.878 frente a la alternativa B que presenta un costo de US\$18.776.976, a nivel de sus humedales.

Los costos de la construcción de la Planta de Biorremediación respeto a las lagunas y los humedales desagregado por componentes, son los siguientes:

Tabla 4. Costos totales de la construcción de la planta de Biorremediación.

| Costos total de la construcción de la Planta de Biorremediación              |                         |                         |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Componente                                                                   | Alternativa A           | Alternativa B           |
| Lagunas Anaerobias                                                           | \$ 7.430.790,82         | \$ 1.592.154,65         |
| Lagunas Facultativas                                                         | \$ 12.509.218,44        | \$ 16.433.828,04        |
| Humedales                                                                    | \$ 10.070.878,20        | \$ 18.776.976,25        |
| Total*                                                                       | \$ <b>30.010.887,46</b> | \$ <b>36.802.958,93</b> |
| *El costo incluye el 25% de administración y otros conceptos - valores en US |                         |                         |

Fuente: cálculos propios

La alternativa A tiene un costo de US\$ 30.010.887, mientras que la alternativa B tiene un costo de US\$ 36.802.958, es decir, un 22% más costosa.

## 14.6 COSTO DEL TERRENO

Teniendo en cuenta que para la alternativa A se necesitan aproximadamente 417.17 hectáreas, y para la alternativa B, 641.03 hectáreas, el costo del terreno necesario accedería a los US\$ 9.270.346 para la alternativa A, y US\$ 14.245.119 para la alternativa B, siendo esta última claramente más costosa. El valor del terreno se estima a \$40.000.000 por hectárea, o US\$ 22.222.dólares por hectárea, aproximadamente, dado su baja utilidad, aunque no es un precio oficial. Ver tabla 22, *Costos del terreno*.

#### 14.7 COSTO TOTAL DE LOS COMPONENTES Y TERRENO DE LA PLANTA DE BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Los costos que corresponden a las lagunas anaerobias, facultativas, los humedales y el terreno necesario para su ejecución, son los siguientes:

Tabla 5. Costos de la construcción de planta de biorremediación más terreno.

| Costos de la construcción de la Planta de Biorremediación + Terreno |                         |                         |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                                                     | Alternativa A           | Alternativa B           |
| Construcción Planta                                                 | \$ 30.010.887,46        | \$ 36.802.958,93        |
| Terreno                                                             | \$ 9.270.346,15         | \$ 14.245.119,68        |
| Total*                                                              | <b>\$ 39.281.233,61</b> | <b>\$ 51.048.078,61</b> |
| * Costos en US\$                                                    |                         |                         |

Fuente: cálculos propios

Siendo la alternativa A menos costos que la alternativa B, con US\$ 39.281.887 frente a US\$ 51.048.078, respectivamente. Para detalles técnicos, ver anexo C.

#### 14.8 COSTOS Y CARACTERISTICAS DE LAS TUBERÍAS

##### *Especificaciones de las tuberías*

Se han identificado un tipo de tubería que pueden usarse para el correcto y eficiente funcionamiento del proyecto. Se debe estimar los costos de las tuberías acorde al tipo de terreno, lugar y kilómetros necesarios que estas deben cubrir.

Basándose en la línea que nos ofrece la empresa PAVCO S.A. se puede utilizar las tuberías tipo NOVALOC la cual “es una tubería de pared estructural con superficie interior y exterior lisa, construida a partir de un perfil extruido acoplado helicoidalmente por un sistema de enganche mecánico”, según Pavco S.A.

Se plantea aproximadamente 100 kilómetros tuberías, para realizar todas las conexiones necesarias entre el municipio de Santiago de Cali, Rozo, Yumbo, Palmira, Candelaria, Villagorgona y Jamundí, con la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales (PTARR). Entre las conexiones, se espera cubrir el municipio de Santiago de Cali, específicamente para el efluente de la PTAR Cañaveralejo bombeada directamente hasta la PTARR, tuberías instalas encima del nuevo Jarillón del río Cauca e interconectando las siguientes estaciones de bombeo, EB Canal sur (2 bombas nuevas requeridas), EB Puerto Mallarino (bombeo existente), EB Florália (bombeo existente) hasta la EB Puente del Comercio (bombeo existente) y EB Puente del Comercio hasta PTARR Palmaseca (bajo el puente nuevo del Paseo del Comercio) vía la recta Palmira y la carretera

a Roza (con AR de Palmira conectadas), es decir, aproximadamente 41.7 Kilómetros solo en la parte municipal de Santiago de Cali.

Para la estimación de los costos de la tubería se tomarán como referencia dos dimensiones de tuberías, una de 36 pulgadas y otra de 42 pulgadas, las cuales se deben utilizar acorde a la cantidad de agua residual que se maneja en cada municipio y sección del proyecto; se debe realizar un estudio técnico más detallada para determinar con exactitud las dimensiones necesarias.

Para determinar los costos de la tubería se realizaron las estimaciones en dos partes. La primera parte corresponde al costo de la tubería, entiéndase como el costo de cada tubo según su dimensión. La segunda parte corresponde a la instalación de la tubería.

#### *Costos estimados*

En base a los precios determinados por PAVCO S.A, se estimó que para un metro lineal (ML) de tubo, de 36” cuesta \$107.586 pesos colombianos. Para el caso de tubos de 42” \$166.492 pesos colombianos, incluido IVA. Se llegó a la conclusión de que la escogencia de las dimensiones en las tuberías no influía tanto en el costo total, sino su instalación.

Tabla 6. Costos unitarios de la tubería

| Costos Unitarios Tubería - \$ Pesos |                              |          |                                |                                      |                      |                      |
|-------------------------------------|------------------------------|----------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Tipo                                | Tramos metros / Unidad - Mts | Pulgadas | Valor unidad / Tramo - Sin IVA | Valor unidad / Tramo - Con IVA * 16% | Valor metro/ Sin IVA | Valor metro/ Con IVA |
| Novaloc                             | 6,5                          | 36       | \$ 602.855,00                  | \$ 699.311,80                        | \$ 92.746,92         | \$ 107.586,43        |
|                                     |                              | 42       | \$ 932.931,00                  | \$ 1.082.199,96                      | \$ 143.527,85        | \$ 166.492,30        |

Fuente: Cálculos propios

Para determinar que dimensión de la tubería se usaría en cada tramo del proyecto, se establecieron cuatro (4) tipos de conexiones:

| Tipos de Conexiones |                                                                                                                                                                  |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo                | Concepto                                                                                                                                                         |
| A                   | Efluente de la PTAR Cañavalejo bombeada directamente hasta la PTARR Palmaseca                                                                                    |
| B                   | Tuberías instalas encima del nuevo jarillón del río Cauca e interconectando la estación de bombeo del Canal Sur, Puerto Mallarino, Floraría, Puente del Comercio |
| C                   | Puente del Comercio hasta PTARR Palmaseca                                                                                                                        |
| D                   | Conexiones entres Roza, Yumbo, Palmira, Candelaria, Jamundí, hasta la PTARR                                                                                      |

Fuente: Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013

Se utilizarían 12500 metros de tuberías de 42” para la conexión tipo A, 19000 metros para de tuberías de 36” para la conexión tipo B, 10200 metros de 42” para la conexión tipo C, y finalmente 58300 metros de tubería de 36” para la conexión tipo D; para un total de 100000 metros, es decir, 100 kilómetros.

Se determinó que el costo de la tubería corresponde a \$6.265.244. Ver tabla 23.

#### *Costos de instalación*

Para determinar los costos de instalación, se tuvieron en cuenta unas variables críticas en relación a la demolición, excavación y relleno del sitio en donde se colocará cada sección de tubo. Estas estimaciones fueron determinadas gracias a conversaciones sostenidas a ingenieros dedicados a la parte de tuberías en EMCALI, de los cuales no se determinó nombres ni referencias bibliográficas.

Según el tipo de terreno por donde debe instalarse la tubería, así mismo son los costos. Se determinó la siguiente tabla:

Tabla 7. Instalación tuberías

| Instalación Tuberías- Variables críticas - 100 Kilómetros |                 |                    |                   |
|-----------------------------------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| Demolición-Excavación-Relleno x ML                        |                 |                    |                   |
| Tipo de terreno                                           | Costo medio     | Ponderación a usar | Metros a instalar |
| Piso en Tierra                                            | \$ 500.000,00   | 70%                | 70000             |
| Pavimento Flexible                                        | \$ 1.000.000,00 | 10%                | 10000             |
| Pavimento Rígido                                          | \$ 1.150.000,00 | 5%                 | 5000              |
| Anden                                                     | \$ 700.000,00   | 5%                 | 5000              |
| Piso en Zona Verde                                        | \$ 600.000,00   | 10%                | 10000             |

Fuente: Cálculos propios

De los 100 kilómetros de tuberías, se plantea instalar un 70% sobre piso en tierra, 10% en pavimento flexible, 10% en piso de zona verde, 5% en pavimento rígido, y 5% en andén, como medida aproximada. Los costos de instalación ascienden a US\$31.207.591. Ver anexo C.

#### *Costos totales*

Los costos de las tuberías, incluida la instalación, se encuentra alrededor de los US\$ 37.472.835,85 para los 100 km propuestos. Ver tablas 21 y 22. *Costo unitario tuberías*, y *Costos tuberías sin instalación*.

Tabla 8. Costo total de la tubería.

| Costo total de la tubería US\$ |                 |                   |                         |               |
|--------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|---------------|
| Cobertura                      | Costo Tuberías  | Costo Instalación | Costo total             | Costo por KM  |
| Región                         | \$ 6.265.244,50 | \$ 31.207.591,34  | \$ <b>37.472.835,85</b> | \$ 374.728,36 |

Fuente: Cálculos propios

Es importante nombrar que el costo estimado de cada kilómetro de tubería, con su respectiva instalación, está alrededor de los \$374.728 dólares

#### 14.9 COSTO TOTAL DEL PROYECTO

Finalmente, tenemos el costo total del proyecto, para las dos alternativas planteadas:

Tabla 9. Costo total del proyecto.

| Costo total del proyecto - (Planta Biorremediación + Tuberías) - \$ US |                  |                  |
|------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| Cobertura                                                              | Alternativa      |                  |
|                                                                        | A                | B                |
| Región                                                                 | \$ 76.754.069,46 | \$ 88.520.914,46 |

Fuente: Cálculos propios

Para el caso de la alternativa A, el costo del proyecto es de US\$ 76.754.069. En relación a la alternativa B, el proyecto tiene un costo de US\$ 88.520.914,46.

Cabe resaltar que cualquier alternativa del proyecto tiene un costo muy inferior a lo que presenta la implementación de la fase II de la PTAR de Cañaveralejo. La alternativa B es la más costosa dentro de las alternativas analizadas, pero aun así sigue siendo menos costosa que la Fase II de la PTAR que desea realizar EMCALI, con un valor de US\$ 240.000.000, es decir, 2.7 veces más costosa que la alternativa B de la PTARR.

#### 15. CÁLCULO DE EFICIENCIA – PUNTO CLAVE

Para identificar la eficiencia de las alternativas dentro del proyecto de la planta de biorremediación, y de estas en relación a la alternativa de la construcción de la fase II de la PTAR propuesta por Emcali, se puede plantear dos pasos importantes:

1. Identificación de la eficiencia de las dos alternativas del proyecto de la planta de biorremediación, y su relación con los costos.
2. Eficiencia esperada de la alternativa de la construcción de la fase II de la PTAR y su relación con los costos, que corresponde a un 85% según EMCALI.

Como podemos observar en la tabla 24, *Eficiencia de alternativas del proyecto*, las dos alternativas A y B, toman una cantidad de agua inicial diferente, pero al final tratan la misma cantidad (8940 L/s). No obstante, la efectividad de las alternativas se puede identificar en el DBO5 presente en las aguas tratadas antes de ser devueltas al río Cauca. Para el caso de la alternativa de tratar el agua de los distintos municipios de forma conjunta, que inicialmente era de 120 DBO5 md/L termina siendo

menor de 15 DBO5 md/L. En el tratamiento de aguas residuales de forma separada pasa de 256 DBO5 md/L a 20 DBO5 md/L o menor. Por eficiencia, es más conveniente la alternativa A, es decir, el tratamiento de aguas residuales de forma conjunta entre todos los municipios beneficiarios de forma inicial en las lagunas anaerobias.

La eficiencia de la alternativa A, que se puede implementar en la Planta Regional de Biorremediación, es notoriamente superior que la eficiencia prometida por la Fase II de la PTAR, 87% y 85% respectivamente. La alternativa B (83%), es ligeramente inferior que la alternativa A y a la Fase II de la PTAR. El 85% de eficiencia de la implementación de la Fase II de la PTAR se basa en la información brindada por EMCALI, como se mencionó anteriormente.

Tabla 10. Efectividad de remoción de la carga orgánica.

| Efectividad de remoción de la carga orgánica |               |               |              |
|----------------------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| Ítem                                         | Alternativa A | Alternativa B | Fase II PTAR |
| DBO5 inicial                                 | 119           | 119           | -            |
| DBO5 Efluente                                | 15            | 20            | -            |
| Porcentaje de la carga orgánica removida     | 87%           | 83%           | 85%          |

Fuente: Cálculos propios – algunos datos no se registran

Teniendo en cuenta que la alternativa A contempla el tratamiento de aguas residuales de otros municipios beneficiados como Jamundí y Palmira, y que tiene una efectividad de remoción inicial de carga orgánica del 87%, es comparativamente más eficiente que la Fase II de la PTAR que solo trataría las aguas residuales del municipio de Santiago de Cali (parcialmente), dejando a la deriva problemas graves como la excesiva contaminación en el Canal CVC Sur, Polvorines y la Sirena.

#### 16. CRITERIOS DE ESCOGENCIA DE ALTERNATIVAS PLANTEADAS, FRENTE A LA FASE II DE LA PTAR.

Como se mostró de forma detallada existen dos grandes proyectos que plantean remediar la excesiva contaminación de aguas residuales, con diferentes enfoques: regional y municipal. Para el caso del enfoque regional tenemos la planta de biorremediación, la cual es el enfoque central del trabajo realizado. Dentro de esta alternativa existen dos sub alternativas con una variación en el diseño, eficiencia y costos, el cual ya se ha identificado, que corresponden a la alternativa A y la alternativa B. Para el enfoque municipal se cuenta con la alternativa planteada por Emcali: la Fase II de la PTAR. Se debe evaluar cuál de estas alternativas debería de escogerse como proyecto a realizar que busque el beneficio no solo a la ciudad de Santiago de Cali, sino a toda una región en un tema tan importante como lo es el tratamiento de las aguas residuales.

Los criterios de escogencia, que al final de sintetizan el método de evaluación ACE o Análisis Costo – Efectividad, son los siguientes:

1. Costos de las alternativas y sub alternativas (alternativa A y B) como proyectos.
2. Identificación de la efectividad de alternativas y sub alternativas (alternativa A y B).
3. Calculo de los potenciales beneficiarios del proyecto: población regional enmarcada en los municipios participantes del proyecto, para 16 años iniciando desde el 2015.

Es posible realizar un trabajo más extendido teniendo datos más preciosos de los costos, pre inversión, inversión en capital, y costos operacionales anuales, entre otros, utilizando el ACE (Análisis Costo – Efectividad) con RPC (Relación Precio – Cuenta) y flujos de costos, concluyendo con una tasa interna de retorno social de proyecto (TIR). Para efectos de este trabajo, que es un estudio de pre-factibilidad y de la cual no se tiene aún datos como los costos operacionales, o variables que registren el mejoramiento por la implementación de la PTARR en la salud de las personas que viven cerca de los lugares donde se concentra excesiva agua residual, se realizó la descripción, comparación de costos, beneficios y efectividad en la remoción de carga orgánica en el agua tratada como determinantes fuertes y parcialmente suficientes para considerar la escogencia del proyecto de la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales en vez de la Fase II de la PTAR que plantea Emcali.

## 17. POTENCIALES BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

A partir de los datos brindados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) de la proyección de la población entre 1985-2005 y 2005 a 2020, del total de la población municipal por área, se tomó como referencia la población de Cali, Candelaria, Jamundí, Palmira y Yumbo desde el año 2015 al 2020, para estimar la población beneficiaria del proyecto hasta el año 2030. Cabe destacar que para el caso de Rozo, se encuentra implícito dentro de la población del municipio de Palmira.

Para calcular los años siguientes a la proyección del DANE que esta hasta el año 2020, es posible utilizar la tasa de crecimiento geométrico. Esta tasa también es conocida como la tasa de interés compuesto, dado que se puede suponer un crecimiento porcentual constante en el tiempo, es decir mantiene constante el porcentaje de crecimiento por unidad de tiempo, y no la cantidad por unidad de tiempo; esto hace que pueda usarse para periodos largos. La fórmula que se puede usar, entre otras variantes, es:

$$Pd = Pa(1 + r)^t$$

Donde Pd es la población futura, Pa es la población actual, r es la tasa de crecimiento anual, y t es el periodo de tiempo. Es decir que la tasa de crecimiento puede obtenerse si despejamos r:

$$r = \left(\frac{P^{t+n}}{P^t}\right)^{1/a} - 1$$

Siendo  $P^{t+n}$  la población al momento actual,  $P^t$  la población inicial,  $a$  la amplitud o distancia en tiempo entre las dos poblaciones de referencia, y  $r$  la tasa de crecimiento anual geométrico.

Para una duración del proyecto de forma inicial entre el año 2015 y 2030, se calculó la tasa de crecimiento geométrica entre el 2010 y 2020, que ha proyectado el DANE, para estimar la población hasta el año 2030.

Tabla 11. Crecimiento geométrico de la población

| Crecimiento Geométrico de la población - Cabecera y Resto |       |
|-----------------------------------------------------------|-------|
| Municipio                                                 | Total |
| Cali                                                      | 1,07% |
| Candelaria                                                | 1,48% |
| Jamundí                                                   | 2,09% |
| Palmira                                                   | 0,65% |
| Yumbo                                                     | 2,38% |
| *Entre 2010 y 2020                                        |       |

Fuente: Cálculos propios

Tabla 12. Población estimada por municipio

| Población estimada por municipio - 2015 a 2030 |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Municipio                                      | 2015             | 2020             | 2025             | 2030             |
| Cali                                           | 2.369.821        | 2.496.442        | 2.632.729        | 2.776.456        |
| Candelaria                                     | 81.700           | 87.820           | 94.530           | 101.753          |
| Jamundí                                        | 119.566          | 132.572          | 147.040          | 163.086          |
| Palmira                                        | 304.735          | 314.411          | 324.827          | 335.588          |
| Yumbo                                          | 117.156          | 131.645          | 148.076          | 166.557          |
| <b>Total</b>                                   | <b>2.992.978</b> | <b>3.162.890</b> | <b>3.347.202</b> | <b>3.543.441</b> |

Fuente: Cálculos propios

En total, se espera que para el año 2030 existan alrededor de 3.543.441 de personas entre los municipios y ciudades de Santiago de Cali, Candelaria, Jamundí, Palmira y Yumbo, el cual corresponderían a la cantidad total de personas beneficiadas por el proyecto de la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales. Es de notar que son muchos los potenciales beneficiarios, además los costos del proyecto per cápita serían cada vez menores.

Es claro que cualquier alternativa (A o B) del proyecto de la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales (PTARR o PRBAR) es proporcional y marginalmente menos costosa que la Fase II de la PTAR, que alcanza los US\$240.000.000. La escogencia entre la Alternativa A y la Alternativa B, pertenecientes a las posibles maneras en que se trataría el agua residual en la PTARR se puede identificar por dos criterios. El primero corresponde al porcentaje de remoción de la carga orgánica del agua, para la Alternativa A es del 87% y para la Alternativa B es del 83%; claramente en este caso se debe escoger la Alternativa A que tiene una mayor remoción orgánica, la Alternativa B tiene una carga orgánica incluso inferior a la que promete la Fase II de la PTAR, que es del 85%. El segundo corresponde a hecho de que siempre la Alternativa A es menos costosa, para cada uno de sus referentes (dimensión de tuberías y kilómetros necesarios de estos), que la alternativa B.

El proyecto de la Planta de Biorremediación beneficiaría a 3.543.441 personas en el 2030; además, son muchos los beneficios indirectos y directos siendo una alternativa de solución integral y regional, diferente a una alternativa de solución parcial como lo es la Fase II planteada por Emcali que solo beneficiaría a 2.776.456 personas en el 2030 que no ataca otros problemas evidentes y preocupantes en el municipio de Santiago de Cali y sus alrededores.

## 18. ESTUDIOS POSTERIORES CON DATOS MÁS PRECIOSOS – ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

### Insumos para un análisis posterior a este trabajo

Al tener datos más precisos sobre el proyecto como lo son los diferentes tipos de costos e inversión, además medidas de impacto cuantificadas, es posible realizar un estudio de factibilidad y post-factibilidad preciosos. En este trabajo, por limitantes de datos, solo se ha llegado a estudios de pre-factibilidad como impulso inicial de la elaboración y formulación del proyecto. No obstante, se realizó un ejemplo que se orienta a un estudio de factibilidad. En este ejemplo, se implementa un el análisis de *Precios Cuenta* y su relación con el **Índice Costo – Efectividad**, en base a la población estimada anteriormente.

### 18.1 RPC (RELACIÓN PRECIO CUENTA)

La razón precio cuenta (RPC), es un factor de conversión que relaciona el precio cuenta con el precio de mercado de un bien o producto. Este nos facilita la corrección de los valores del mercado para poder realizar una evaluación económica, con el objetivo de encontrar los precios sociales, es decir, aquellos precios que no tienen en cuenta las distorsiones del mercado. Para ello, se tomó como referencia la estimación de precios de cuenta para Colombia realizada por Cervini (1990), para el Banco Iberoamericano de Desarrollo, tomando la referencia de bienes producidos más cercanos a los costos unitarios que se tiene de esta evaluación. Usamos las siguientes razones de precio cuenta para calcular los costos sociales del proyecto:

Tabla 13. Razón precio cuenta.

| Razón Precio Cuenta                                                                                         |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Fabricación de materias sintéticas por polimerización y copolimerización, incluye caucho y látex sintéticos | 0,78 |
| Fabricación de asfalto y sus mezclas para pavimentación, techado y construcción                             | 0,82 |
| Fabricación de maquinaria para ser remolcada                                                                | 0,79 |
| Fabricación de maquinaria y equipos especiales para la construcción                                         | 0,8  |

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| Insumos varios                     | 0,79 |
| Construcción industrial            | 0,79 |
| Maquinarias y equipos industriales | 0,77 |
| FC inversión industrial            | 0,87 |
| Terrenos                           | 1    |
| Mano de obra no calificada         | 0,6  |
| Tuberías                           | 0,79 |
| Obreros calificados                | 0,6  |

Fuente: Cervini (1990)

Una vez obtenido los RPC, estimamos los costos sociales para cada uno de los ítems del proyecto según el RPC que más se aproximaba. Ver tabla 25, *Precios cuenta*.

Estimado los costos sociales, se procede a realizar el análisis social del proyecto desde el índice costo – efectividad, de la cual se usó una tasa social de descuento del 12% que es la estándar para evaluación de proyectos de inversión social en Colombia.

No obstante, dado el trabajo de Rodríguez (2007), el cual plantea una tasa social de descuento del 8.5% parar Colombia, podemos realizar una breve comparación en entre los diferentes índices obtenidos con esta dos tasas. Dada la incorporación de nuevos enfoques que se basan en un asignar mayor importancia al esquema de financiación de las economías emergentes que han venido sustituyendo el crédito con multilaterales por la emisión de bonos de deuda interna y externa afectando la estructura de corto y largo plazo de sus tasas de interés (Rodríguez, 2007), ha abierto un campo a la necesidad de restimar la Tasa Social de Descuento (TSD) para Colombia.

“Los resultados obtenidos por diversos autores han permitido determinar que la TSD en el caso colombiano está influenciada fuertemente por la tasa de ahorro privado interno y en alguna menor proporción por la inversión real y el sector externo. Las estimaciones de la TSD sin riesgo,  $TSD_{SR}$ , permitieron obtener un valor promedio de 8,32%, que al incorporarle la prima de riesgo determinada por la volatilidad del consumo y la aversión al riesgo, determinan una TSD de 8,5%, la cual se sitúa 3,5% debajo de la TSD de 12% actualmente empleada para la evaluación proyectos” (Rodríguez, 2007: 75). Es decir, podemos deducir, dada la idea del autor, que la generación actual hace un mayor sacrificio, toda vez que se ve obligada a aumentar su nivel de ahorro y reducir su nivel de consumo con respecto a generaciones futuras. Por tal, es interesante tomar de forma comparativa, además de la TSD de 12\$, una TSD de 8.5%, basándose en la idea de que la TSD indica cuánto más preferible es, para la sociedad, un beneficio en el presente con respecto al mismo beneficio percibido un periodo más tarde (Souto, 2003), donde su determinación es un problema que contempla decisiones de consumo y ahorro.

## 18.2 ÍNDICE COSTO – EFECTIVIDAD Y FLUJOS DE COSTOS

Consiste en expresar los costos por beneficiario (C/B), de las alternativas del proyecto, en términos de una cuota anual, cuyo valor actualizado es igual al VPC de los costos del proyecto. Como se determinó en la metodología a utilizar anteriormente, la fórmula es la siguiente:

$$\frac{C}{B} = \frac{\text{Min}(VPC)}{\text{Número de beneficiarios}} = \frac{\left[ \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+r)^n} \right]}{\text{Número de beneficiarios}}$$

Para el caso de la alternativa A y la alternativa B se realizó la Matriz de Flujo de Costos, para n=16 periodos hallando el Min (VPC) y la población estimada para cada caso, es decir, 3.543.441 personas (como factor de medida de efectividad). De igual forma, se realizó una Matriz de Flujo de Costos del proyecto de la Fase II de la PTAR a manera de ejemplo comparativo, con n=16, el RPC de 0.80 (promedio) aplicado sobre el valor total del proyecto que es US\$240.000.000 y con una población beneficiada del 2.776.456 personas; dado que no se tiene costos desagregados de este proyecto de la Fase II, el RPC se realizó de forma sencilla aplicándole un  $0.80 \times 240.000.000 = 192.000.000$  que si bien no es la forma correcta de hacerlo, nos da una aproximación comparativa para el ejercicio. Dichas matrices se presentan en el anexo C, dado la extensión del cuadro por el número de periodos, con los respectivos costos, el interés del préstamo y la cantidad (Q) de personas beneficiadas. La tasa social de descuento (TSD) que se utilizó para este caso fue del 12%, tasa para Colombia determinada por el Departamento Nacional de Planeación, DNP, el cual expresa que la TSD “es uno de los parámetros más importantes en la evaluación socioeconómica de proyectos, por ser el factor que permite comparar los beneficios y los costos económicos del proyecto en diferentes momentos del tiempo y con relación al mejor uso alternativo de esos recursos”. No Obstante, también se realizó una estimación con una TSD del 8.5%. El periodo evaluado va del año 2015 al 2030, es decir, siendo n = 16.

## 18.3 RESULTADOS OBTENIDOS

El Índice Costo – Efectividad, para cada una de las alternativas A y B, y para la Fase II de la PTAR, determinado por el costo per cápita en los beneficiarios del proyecto en dólares, es el siguiente:

Tabla 14. Índice costo – efectividad TSD 12%.

| Índice Costo - Efectividad - TST 12% |                            |               |
|--------------------------------------|----------------------------|---------------|
| Proyecto                             | Índice de costo Per Cápita |               |
| Planta Regional de Biorremediación   | Alternativa A              | Alternativa B |
|                                      | \$ 9,45                    | \$ 10,99      |
| Fase II - PTAR                       | \$ 36,43                   |               |

Fuente: cálculos propios

Lo anterior muestra que la alternativa A siempre tiene un costo per cápita menor que la alternativa B, y estas a su vez un costo per cápita menor a la Fase II - PTAR. Para la alternativa A, el índice de costo efectividad es de US\$ 9,45, frente a un US\$10,9 de la alternativa B. Observamos que, realizando cálculos muy generales, el índice costo-efectividad de la Fase II-PTAR es de US\$36,43, muy superior a la alternativa A y B, es decir, más indicios que reafirmar al proyecto de la Planta Regional de Biorremediación como la alternativa más viable.

Si realizamos el mismo cálculo con una tasa TSD de 8.5%, tenemos que:

Tabla 15. Índice costo – efectividad TSD 8,5%.

| Índice Costo - Efectividad - TST 8,5% |                            |               |
|---------------------------------------|----------------------------|---------------|
| Proyecto                              | Índice de costo Per Cápita |               |
| Planta Regional de Biorremediación    | Alternativa A              | Alternativa B |
|                                       | \$ 11,26                   | \$ 13,09      |
| Fase II - PTAR                        | \$ 43,39                   |               |

Fuente: cálculos propios

Al comparar la TSD 8.5% con la de 12%, observamos que se mantiene la misma relación entre los índices de cada una de las alternativas. No obstante, el costo per cápita del proyecto aumenta entre US\$1 y US\$2 para la alternativa A y B, y US\$5.1 para la Fase II – PTAR, dado la cantidad menor de beneficiarios respecto a la alternativa A y B; otro ejemplo que ayude a la escogencia del proyecto que más beneficia a la población estimada.

#### 18.4 SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA VIABLE

Para realizar la selección de la alternativa más viable entre las analizadas, podemos simplificar los resultados obtenidos a partir de la evaluación realizada del proyecto y sus alternativas, tomando como referencia la TSD al 12%, Ver tabla 26, *Resultados obtenidos de la evaluación del proyecto – Post Factibilidad*.

Además de basarnos en la diferencia de costos generales entre la Planta Regional de Biorremediación y la Fase II, el porcentaje de carga organica removida para cada una, y el planteamiento de los beneficios que produciría la solución integral que produciría la implementación de la Planta Regional de Biorremediación, podemos tener en cuenta otro

argumento más para viabilizar el proyecto analizado en este trabajo, el índice Costo-Efectividad. No obstante, este último argumento nos sirve para escoger entre la Alternativa A y B planteadas en el proyecto de la Planta de Biorremediación, y la Fase II de la PTAR.

Si tomamos el Índice Costo – Efectividad de un posible análisis de Factibilidad o Post – factibilidad, encontramos que la alternativa A siempre es menos costosa y más eficiente que la alternativa B, y claramente menos costosa y más eficiente que la Fase II de la PTAR, 87% frente al 85% de remoción de carga orgánica en el agua respectivamente; manteniendo el supuesto de que el volumen de aguas residuales sea directamente proporcional al aumento poblacional.

Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad y riesgos identificados a lo largo de este trabajo.

## 19. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RIESGOS

La implementación de la Planta Regional de Biorremediación de Aguas residuales, además de sus beneficios para los diferentes municipios del Valle del Cauca tratando de forma directa problemas que agobian la región, también presenta sensibilidades o riesgos que se deben tener presentes. Uno de los problemas está relacionado con las aves que puede atraer la planta de biorregeneración dado los humedales que en él se implementaría, el cual puede convertirse en un hogar para muchos seres vivos. El problema reside en que aproximadamente a 5 kilómetros de la zona de posible construcción de la planta se encuentra el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón, representando las aves un problema para los aviones por posibles colisiones con estas, dado el comportamiento migratorio o por otros factores.

Otro problema reside en el posible aumento considerable de las aguas residuales, es decir, la cantidad de litros por segundo generados por la expansión poblacional y el aumento de barrios informales, que no estén contemplados dentro de la tasa esperada de crecimiento poblacional geométrica estimada. Esto puede afectar de forma considerable el funcionamiento de la planta si no se piensa en soluciones de sostenibilidad. No obstante, dado que las hectáreas disponibles de las tierras en Palmaseca son mayores que las necesarias, puede construirse a medida que se vaya necesitando más lagunas anaerobias y facultativas, al igual que aumentos progresivos del humedal; se deben realizar estudios previos sobre la necesidad de implementar tuberías con diámetros mayores a 36” y 42”, por dos motivos: a) aumento población no esperado, que conlleva a aumento de aguas residuales no esperado, y b) conexiones futuras con otros municipios.

El aumento de residuos sólidos en el Canal CVC Sur por la no separación temprana de las aguas residuales y las aguas lluvias, y el arrojado de residuos a lo largo del canal pueden afectar seriamente el funcionamiento de la planta. Por tal es importante idear una conciencia ecológica que reduzca dicha contaminación; además de implementar conceptos como sensores de carga orgánica y los

taludes alrededor del canal formados por las tuberías instalados a cada lado, para evitar inundaciones y que la población caleña se abstenga de arrojar escombros y desechos al canal.

Puede existir en cierto momento problemas por los olores producidos en la planta de biorremediación por el tratamiento realizado. No obstante la dirección del viento alejaría dichos olores de los lugares poblados. Según proyecciones técnicas la probabilidad de que dichos olores aparezcan es poca, pero es un riesgo para la salud y bienestar de la población cercana a la zona. Los terrenos también pueden ser un riesgo, en el sentido de que es posible que los dueños de estas tierras no cedan a la compra por parte de la Administración Municipal, o su costo aumente por factores de demanda. Por tal se debe plantear estrategias jurídicas que faciliten la adquisición de dichas tierras a un precio ajustado, y que no exceda en gran medida el valor por hectárea que se ha planteado en este trabajo. De aquí puede desprenderse otra situación, y es la posible falta de motivación de la Administración Municipal de llevar a cabo el proyecto, además de la contra que realizaría las Empresas Municipales de Cali, EMCALI, dado que se plantea por parte de ellos la elaboración de la Fase II de la PTAR.

El riesgo más representativo puede ser el hecho de que los municipios que participarían en el proyecto no lo hagan, es decir, busque su propio mecanismo de tratamiento de agua residual. Esto implicaría una reducción sustancial del impacto que puede tener el proyecto en la región, puesto que es posible que la contaminación del río Cauca se siga presentando y sea más difícil la limpieza de este. Además de ello, el costo de la implementación de la planta recae sobre una población menor a la planteada; en otras palabras, el costo recae solo a la población del municipio de Santiago de Cali, aunque se planté lagunas más pequeñas. Se debe buscar estrategias políticas e incentivos que busquen la unión regional para el tratamiento de las aguas residuales. Incluso en el caso de que no se acepte el proyecto en el municipio de Santiago de Cali, el proyecto es económicamente sustentable y eficiente en la remoción de carga orgánica de las aguas residuales que produce beneficios en el medio ambiente, en la salud, en la generación de ingresos y en otros factores, que puede implementarse en otros lugares de Colombia.

## 20. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES

La evaluación realizada, en base a un estudio de pre – factibilidad, sobre el proyecto de la Planta Regional de Biorremediación de las aguas residuales presente ciertas limitaciones que deben tenerse en cuenta. En primera instancia, la dificultad técnica del proyecto y los conocimientos en ingeniería sanitaria fueron determinantes a la hora de estimar los costos. Durante la formulación del proyecto se realizó diversas consultas a los ingenieros del instituto CINARA, de la Universidad del Valle, los cuales fueron vitales para comprender los diseños básicos del funcionamiento de la planta. A partir de las explicaciones técnicas del funcionamiento y de la forma en que deben ser construidas las lagunas, humedales, y la implementación de las tuberías enmarcó la forma en que se formuló y se

calculó cada uno de las dimensiones de las lagunas, altura de los diques, capacidad máxima de agua, altura de los diques, volúmenes de los núcleos, áreas necesarias, entre otros, que dio paso a la estimación providencial de los costos de forma general y detallada del proyecto. Dado que dichos cálculos estructurales y estimación de costos en su mayoría son de autoría propia, es posible que falten criterios y conceptos que se encuentren por fuera del alcance de este trabajo, haciendo que la estimación total del costo del proyecto este subestimado del que sería el valor real. Por tal es importante que en base a este trabajo se realicen estimaciones de costos más precisos. No obstante, se espera que el costo del proyecto real no difiera mucho del estimado, es decir que la aproximación de dichos costos realizados en este trabajo sirve como argumento sólido para dar una preliminar de para la presentación y viabilidad del proyecto, frente a la implementación de la Fase II de la PTAR, que es casi tres veces más costoso.

Otro aspecto que debe tenerse en cuenta es la falta de información que se tiene en las matrices de los flujos de costos, dado que no se tiene hasta el momento una idea clara de lo que serían los costos de mantenimiento anuales, aunque se espera que sean relativamente bajos dado que el proceso natural que se lleva en el tratamiento de las aguas residuales. En sí, los costos de mantenimiento vendrían siendo costos de mano de obra, costos de personal técnico, químicos y materiales necesarios en menor medida para ciertos procesos, reparaciones de tuberías, limpieza de lagunas, bombeos de aguas en ciertos puntos específicos, entre otros. También se debe tener en cuenta que en este trabajo no se contemplaron ciertos aspectos técnicos, como por ejemplo el sistema de separación de aguas tempranas, motores de bombeos en ciertos puntos de la ciudad y otros aspectos relacionados con funcionamiento fuera del perímetro de la Planta de Biorremediación, siendo costos que no son muy representativos dentro del costo total estimado, pero si importantes a la hora de realizar la formulación del proyecto y su licitación.

Otro aspecto importante es que, dado que este trabajo es una evaluación ex – ante, es decir, un estudio de Pre-Factibilidad, no fue posible estimar monetariamente los beneficios ambientales, de salud y de generación de ingreso que produciría la implementación de este proyecto. Se espera que los beneficios ambientales se enmarquen en varios aspectos. Por ejemplo, la descontaminación progresiva del Río Cauca, que es de vital importancia para el sostenimiento de la población y todo lo que con eso conlleva; la descontaminación del Canal CVC Sur, el tratamiento adecuado de aguas residuales de los sectores en expansión de la ciudad de Santiago de Cali y sus alrededores, entre otros. También los beneficios en relación a la salud de la población, dado que la reducción de las aguas residuales mal manejadas en zonas del municipio reduciría la probabilidad de contagio de enfermedades a la población vulnerable residente de forma directa e indirecta. De forma directa puede darse por el contacto con el agua residuales al beber o introducirse en aguas que aparentemente puedan estar limpias, y de forma indirecta por la contaminación de las aguas residuales, junto con los lixiviados que pueden estar contaminando los acuíferos de las zonas cercanas al Río Cauca. Por tal, en la elaboración del proyecto se debe tener en cuenta la forma en que debe tratarse las aguas de los lixiviados, la cual ya empezó a ser tratada por una planta especializada en Navarro, donde dicho tratamiento previo será vertido al alcantarillado de la ciudad para ser tratado por segunda vez en la PTAR, se debe reorientar este proceso a la planta formulada en este proyecto.

Es posible estimar la generación de ingreso que puede darse la implementación del proyecto, el cual será un argumento fuerte e importante, al igual que los beneficios ambientales y de salud, para llevar a cabo la realización del proyecto. Se puede calcular con datos precisos la cantidad de empleos que generaría la construcción de la planta, la implementación de tuberías y cada una de las adecuaciones necesarias, además de los empleos relacionadas con la operación y mantenimiento de la planta. De forma indirecta el mejoramiento de las aguas residuales trae consigo varios beneficios relacionados con el ingreso; por ejemplo, puede darse convenios para reutilizar las aguas tratadas para producción y siembra agrícola a bajo costo, impulsado aumentos productivos y esperando una mayor inversión de capital humano o tecnológico, si la estructura y visión empresarial por parte de la organización agrícola así lo desee. También puede darse este comportamiento en el sector industrial; de igual forma puede brindársele servicios de conducción y tratamiento de aguas residuales, y su reutilización, a lugares como el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón, o el estadio del Deportivo Cali. Además de ello, el buen manejo de las aguas residuales, el mejoramiento ambiental, y el mejoramiento de la salud en los sectores en donde dichas aguas son un problema grave, que en su mayoría son los barrios más marginados de la ciudad, produciría un aumento de la valorización de los predios, como efecto indirecto del progresivo mejoramiento de las condiciones de vida.

Con la información anterior, en posteriores trabajos, puede calcularse los costos evitados que produciría este proyecto, es decir, la reducción de riesgo de contaminación, de deterioro ambiental, y su influencia en la vida cotidiana y agrícola, entre otros. Puede analizarse el impacto del excesivo costo en las tarifas de los servicios públicos para financiar inversiones en plantas de tratamiento tradicionales poco eficientes y que no atacan todos los problemas identificados, como la contaminación constante del Canal CVC Sur hacia el río Cauca. Se pueden hacer preguntas como las siguientes: ¿Qué costo se evitaría al reducir la probabilidad de contagio de enfermedades por el contacto con las aguas residuales en la población al no tener que incurrir en programas de saneamiento, tratamiento de salud, entre otros, si se aplicase el proyecto evaluado? ¿Cuánto nos costará descontaminar el río Cauca en un futuro si no actuamos en su descontaminación ahora, en relación? ¿Cuánto costará las modificaciones y actualizaciones de la PTAT y la PTAR para sufragar la contaminación creciente a la que estaremos expuestos en un futuro? ¿Cuánto cuesta estructurar de una mejor manera el tratamiento de aguas residuales de barrios en expansión en la ciudad, y en los demás municipios si en un futuro es tanta agua y tan contaminada que se hace difícil de tratar?

Los beneficios nombrados anteriormente pueden estimarse a partir de investigaciones, buscando datos que sustenten los impactos directos e indirectos del proyecto en cada uno de los conceptos nombrados. Por ello, este trabajo sirve de base para la elaboración de posteriores investigaciones que se deseen realizar, abriéndole campo a diversos temas a tratar como lo son forma correcta en que deben tratarse las aguas residuales en relación a la inversión que deba realizarse, dado que este recae sobre la población de la región o municipio. Otro tema que puede investigarse a partir de este trabajo es el impacto que puede tener este proyecto sobre las tarifas de los servicios públicos, la cual significa un tema importante a tener en cuenta a partir de los costos de la alternativa escogida y del índice de costo – efectividad.

Relacionando lo anterior con la conclusión de este trabajo, es posible afirmar que el proyecto evaluado es viable, dado que el costo per cápita que representa frente a los beneficios que contrae es considerablemente bajo frente a lo que sería en la implementación de la Fase II de la PTAR, además que el porcentaje de la carga de orgánica removida de las aguas residuales tratadas en 2% más alta que la Fase II, 87% del proyecto evaluado frente al 85% mencionado por EMCALI.

Además de ello, se atacan problemas que no son considerados de forma directa por EMCALI. Por ejemplo, las aguas residuales de los sectores altos de la ciudad (Polvorines y la Sirena), el Canal Sur CVC, y las aguas residuales de los municipios aledaños que afecta directamente el río Cauca, siendo una externalidad negativa para el municipio de Santiago de Cali en todos los sentidos. Se debe resaltar los beneficios esperados respecto al medio ambiente, la salud y la generación de ingresos, sin olvidar los costos anuales bajos de mantenimiento que implicaría la realización de la planta de Biorremediación frente a un proyecto altamente costo y poco efectivo como lo es la Fase II de la PTAR.

Si realizáramos un estudio más preciso, y tomamos los resultados obtenidos en el ejemplo de estudio como insumo para trabajos posteriores, tendríamos que el costo calculado, determinado por el índice costo – efectividad que es US\$ 9,45, sea realmente bajo frente a las alternativas de desarrollo y mejoramiento de vida que nos ofrece el proyecto evaluado; de igual forma se espera que el costo por beneficiario del proyecto se vea reflejado en un menor impacto sobre las tarifas a lo largo de los años de funcionamiento, el cual puede ser sustentado con un trabajo adecuado sobre el análisis de tarifas que se propone a partir del análisis realizado. Cabe mencionar que la planta está diseñada para ser expandida en un futuro dado la creciente población de los años venideros, el terreno en el cual posiblemente pueda ubicarse la planta brinda la posibilidad de implementar más lagunas y sistemas de tratamiento naturales.

Con la implementación del proyecto, a medida que se vaya limpiando el Canal CVC Sur, se irá reduciendo la posibilidad de que las aguas que son depositadas en él vengan con exceso de contaminación de material orgánica y lodos, evitando que se presente turbiedad en el río Cauca en periodos de lluvia. Esto hace que dichas aguas sean intratables para la PTAT (Planta de Tratamiento de Agua Potable), que es la causa de los cortes de agua potable en la ciudad de Santiago de Cali; problema con el cual se justificó la necesidad de un proyecto alternativo que solucione este y otros problemas latentes. Evitando los cortes, es probable que se reduzcan en parte las pérdidas de agua potable del sistema en la ciudad, que acceden casi al 50% del total del agua potabilizada, dada la reducción de tuberías averiadas por los cambios de tensión constante de la presión del agua enviada desde la PTAP hacia los hogares, industrias o diversos sectores de la ciudad. De igual forma, al buscar una relación entre el tratamiento de los lixiviados y este proyecto, se evita la filtración de aguas contaminadas a las tuberías de agua potable ya averiadas, disminuyendo la contaminación de enfermedades venéreas y de malformaciones.

Si se reduce el porcentaje de pérdida de agua potable sucederían dos sucesos muy interesantes. En el caso de que se tuviera una pérdida de agua cercana al 0%, las tarifas de los servicios públicos disminuirían, dado que se debería de cobrar la mitad del costo por el servicio de agua potable. También se podría enviar agua potable a otros municipios sin alterar la presión de las tuberías para

el municipio de Santiago de Cali y percibir ingresos adicionales por esta acción. Razones de peso para considerar la realización de un proyecto que minimice las interrupciones de agua en el municipio de Santiago de Cali.

Finalmente, una planta de tratamiento anaerobio de aguas residuales es una alternativa viable, sostenible, de gran importancia, en países en desarrollo, como lo es Colombia. Como lo expresa Torres (2012), en países con grandes problemas de saneamiento y de pocos recursos, se requieren plantas de tratamiento de aguas residuales que son apropiadas y sostenibles, dado que en estos países se localizan regularmente en regiones tropicales y subtropicales, es decir, regiones donde la temperatura son superiores a los 20<sup>0</sup>C. En zonas donde existen estas temperaturas la digestión anaerobia es una tecnología clave que genera subproductos con valor agregado como bioenergía, nutrientes y aguas para el reúso. Además resaltan que América Latina es la región con mayor número de Plantas de Tratamiento Residuales Doméstica PTARD, que para efectos de este trabajo son plantas de tratamiento para grandes volumen de aguas residuales. La autora plantea una reflexión en su artículo respecto al uso de la tecnologías alternativas, como la presentada en este trabajo, mencionando que dichas tecnologías deben ser compatibles con las condiciones de los países en desarrollo, donde los problemas de tratamiento de aguas residuales puede ser enfrentado de manera responsable y sostenible con tecnología eficientes y de bajo costo, en términos de beneficios, costos evitados, y eficiencia. Se debe, y es posible, la implementación de este proyecto para la región del Valle del Cauca, con proyección a otras regiones de Colombia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIAS ARBELÁEZ, FABIO ALBERTO, (2005) “Evaluación del desarrollo sostenible en la cuenca del Rio Tuluá: a propósito de los planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia”. Hace Parte del proyecto de Investigación “Análisis de Modelos de Desarrollo Sostenible para la cuenta del Rio Tuluá”. Universidad del Valle.

ARONSSON, PAR Y PERTTU, KURTH. “The Forestry Chronicle”. Vol. 77(2): 293-229.

BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. Propuesta de Préstamo, “Programa de agua potable y saneamiento del área metropolitana de la ciudad de Buenos Aires y del Conurbano Bonaerense”. Documento del Banco Interamericano de Desarrollo. Línea CCLIP (AR-X1013)

BOLTON, KEITH G. E. AND GREENWAY, MARGARET. “Humedales Construidos con Bosques de Árboles”. Water Science and Technology. Volumen 30, Numer 6, pp 199-206(8) (1999).

BOARDMAN, ANTHONY E, ET AL. (2001) “Cost-benefit analysis: concept and practice”. 2nd ed. Prentice Hall. New Jersey.

CASTRO, et al, (2008). “Metodología de preparación y evaluación de inversion pública con ayuda de planillas paramétricas”. Universidad de los Andres, Facultad de Economía. CEDE, Ediciones Uniandes, 2008.

CONTRERAS, EDUARDO, (2004) “Evaluación social de inversiones públicas: enfoques alternativos y su aplicabilidad para Latinoamérica”. Serie de Publicación de las Naciones Unidas.

CORREA RESTREPO, GLORIA, (2008). “Evaluación y monitoreo del sistema de lagunas de estabilización del municipio de Santa Fe de Antioquia, Colombia.”. Tesis para maestría. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. Medellín, 2008.

DECRETO 475 DE 1998. Normas técnicas de calidad del agua potable. Marzo 10 de 1998, CRA.

DURAN HERNÁNDEZ, ZULMA LORENA (2009). “Evaluación del desempeño de un conjunto de lagunas para el tratamiento de las aguas de riego provenientes del canal Tibanica”. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá, 2009.

FERRO, GUSTAVO. LENTINI, EMILIO Y ROMERO, CARLOS A., (2011) “Eficiencia y su medición en prestadores de servicio de agua potable y alcantarillado”. Documento de Proyecto. CEPAL – Organización de las Naciones Unidas.

GODÍNEZ GARNICA, RAFAEL, (2007). “Evaluación socioeconómica del saneamiento de aguas residuales de Morelia, Mich”. Organismo operador de agua potable, alcantarillado y saneamiento de Morelia. Junio de 2007.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, (2006). “Guías para la calidad del agua potable”. Incluye el primer apéndice. Vol. 1: Recomendaciones. (Recuso electrónico). Tercera Edición.

HÉCTOR CERVINI, (1990), “*Estimación de precios de cuenta para Colombia*”, División de Investigación de Política de Desarrollo Banco Interamericano de Desarrollo Washington, D.C.

LAING, DOUGLAS, (2013). Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Santiago de Cali, Colombia.

LENTINI, EMILIO, (2011) “Servicios de agua potable y saneamiento: lecciones de experiencias relevantes”. CEPAL- Organización de las Naciones Unidas.

MARTÍNEZ MORALES, DAVID ANTONIO, (2003). “Análisis comparativo de criterios de diseños de lagunas de estabilización para ciudades pequeñas y medianas”. Tesis de pregrado, Ingeniería Civil. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. México D.F, 2003.

PERALTA, et al, (1999). “Diseño de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales provenientes de las industrial procesadores (empacadoras) de camarón”. Tópico de grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. Junio de 1999.

PEÑA VARÓN, MIGUEL R., (2002). “Tratamiento sostenible de aguas residuales domesticas en regiones tropicales: Desarrollo de lagunas anaerobias de alta tasa (HRAP)”. XXVII Congreso Iberoamericano de Ingeniera Sanitaria y Ambiental, Cancún, México, 2002.

RODRÍGUEZ, ROMEL, 2007, “*Reestimación de la Tasa Social de Descuento en Colombia a partir del desarrollo de su mercado de capitales durante el periodo 1995-2005*”, Equidad y Desarrollo, julio-diciembre, número 008, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia, pp. 55-81  
Salamanca León, Jaime, (2001) “Revista Regulación de agua potable y saneamiento básico”. Número 6 – Febrero de 2001. CRA – Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico.

SALINES RAMÍREZ, JORGE MARTÍN, (2011) “Restos a futuro en el sector de acueducto y alcantarillado en Colombia”. CEPAL- Organización de las Naciones Unidas.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. (2000). “Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS -2000”. Bogotá, noviembre de 2000.

TORO, ANDRÉS, (2014). “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales”. Universidad del Valle. Instituto Cinara.

TORRES, PATRICIA, (2012). “Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo”. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 19, o. 115-129. Diciembre 2012. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín, Colombia.

SCRAGG, A, (1995)). “Biotecnología para los Ingenieros. Sistemas Biológicos en procesos tecnológicos. Editorial Limusa, pp. 363-377.

SOUTO, G., 2003, “*El descuento social*”, Revista de Economía Pública 165, Instituto de Estudios Fiscales: 99- 126.

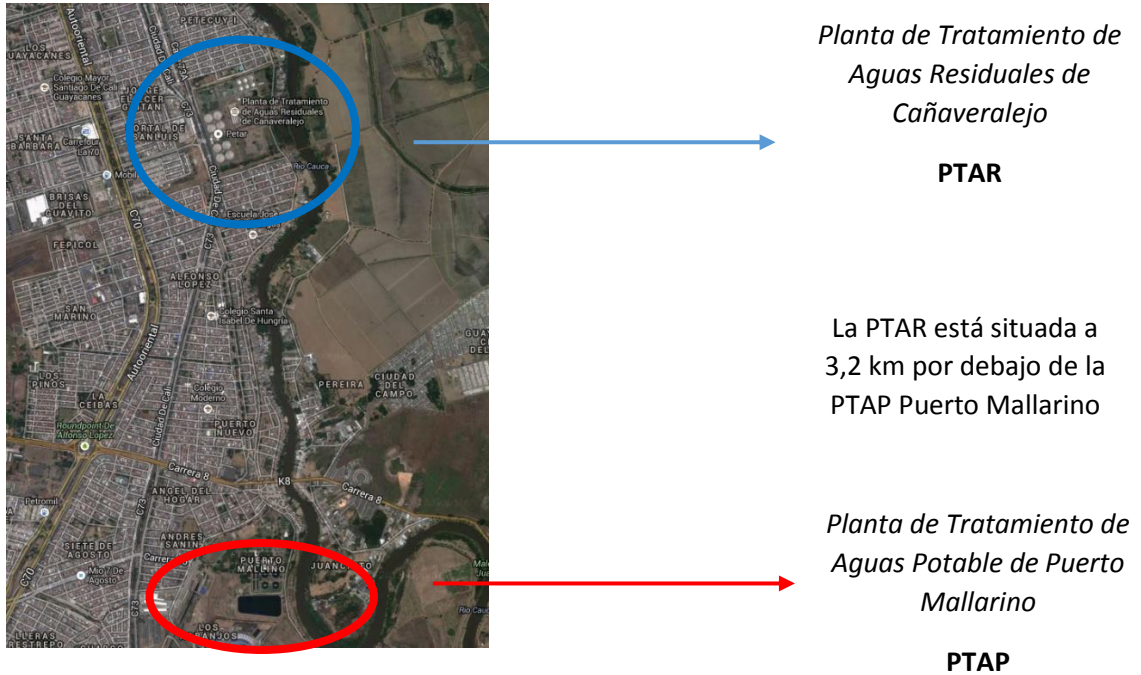
VERGÈS, JEAN-FRANÇOIS, (2010) “Experiencias relevantes de marcos institucionales y contratos en agua y alcantarillado”. Documento de proyecto. CEPAL – Organización de las Naciones Unidas.

VERGÈS, JEAN-FRANÇOIS, (2010) “Servicio de agua potable y alcantarillado: lecciones de las experiencias de Alemania, Francia e Inglaterra”. CEPAL- Organización de las Naciones Unidas.

VIVES, ANTONIO et al. (2007) “Estructura Financiera de Proyectos de Infraestructura en asociaciones públicos-privadas: una aplicación en agua y saneamiento”. Banco Interamericano de Desarrollo.

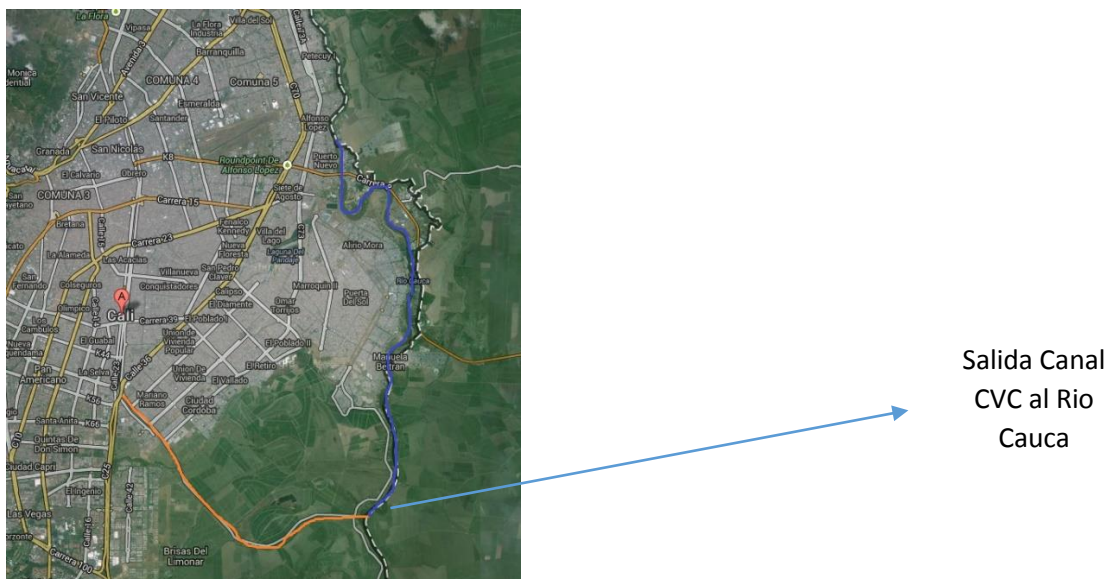
## Anexo A (Figuras)

Figura 4. Vista de ubicación de la PTAR y la PTAP



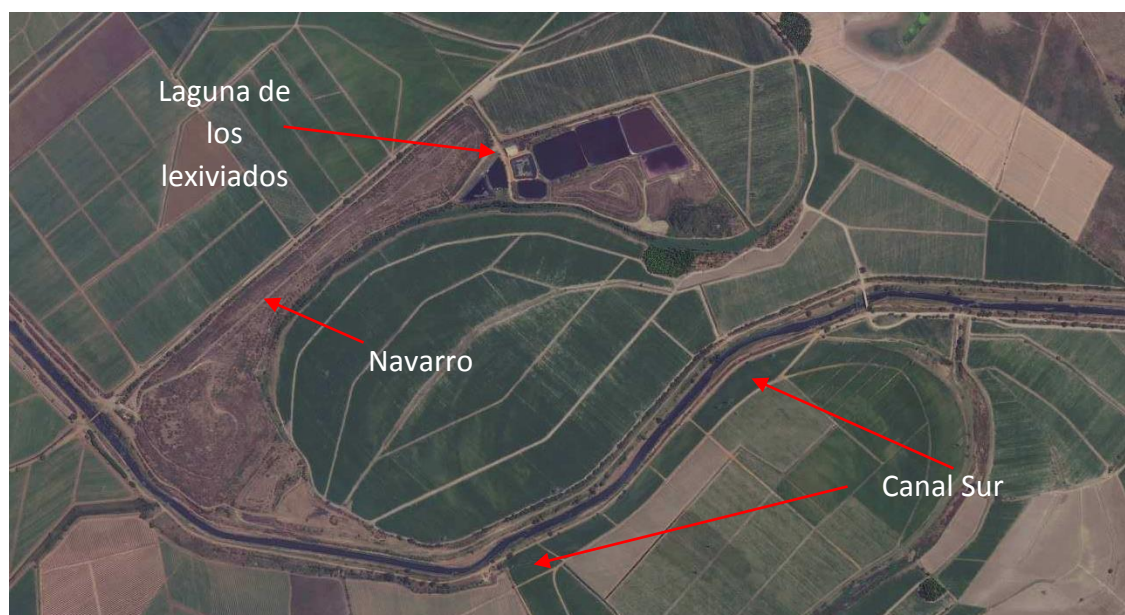
Fuente: Tomado desde Google Earth 2013, 20 de Octubre de 2013

Figura 5. Recorrido Canal Sur CVC.



Fuente: Tomado desde Google Earth 2013, 20 de Octubre de 2013

Figura 6. Ubicación de los lixiviados y Navarra frente al Canal Sur



Fuente: Bing Maps. Microsoft Corporation 2013.

Figura 7. Salida del Canal CVC al rio Cauca



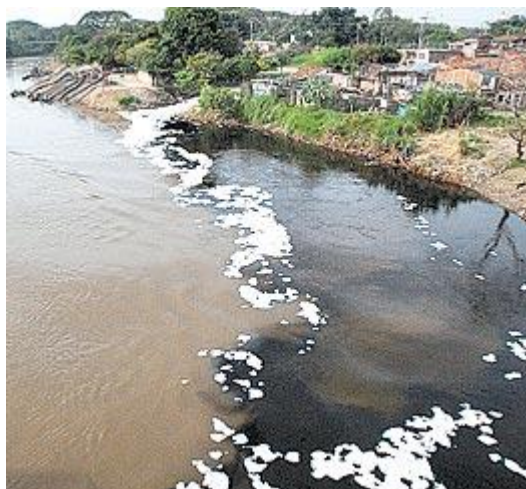
Fuente: Bing Maps. Microsoft Corporation 2013.

Figura 8. Contaminación del rio cerca a la bocatoma de la planta de Puerto Mallarino.



Fuente: Bing Maps. Microsoft Corporation 2013.

Figura 9. Contaminación Canal Sur CVC.



Fuente: El Pais.com.co. Abril 28 de 2010

La Mancha de contaminación proveniente del Canal Sur es Notable

Figura 10. El efluente de la primera fase de la PTAR



Fuente: Tomado desde Google Earth 2013, 20 de Octubre de 2013

Figura 11. Mirada Previa a la implementación de tuberías para la transición de aguas residuales en el perímetro urbano



Fuente: Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013. Laing (2013)

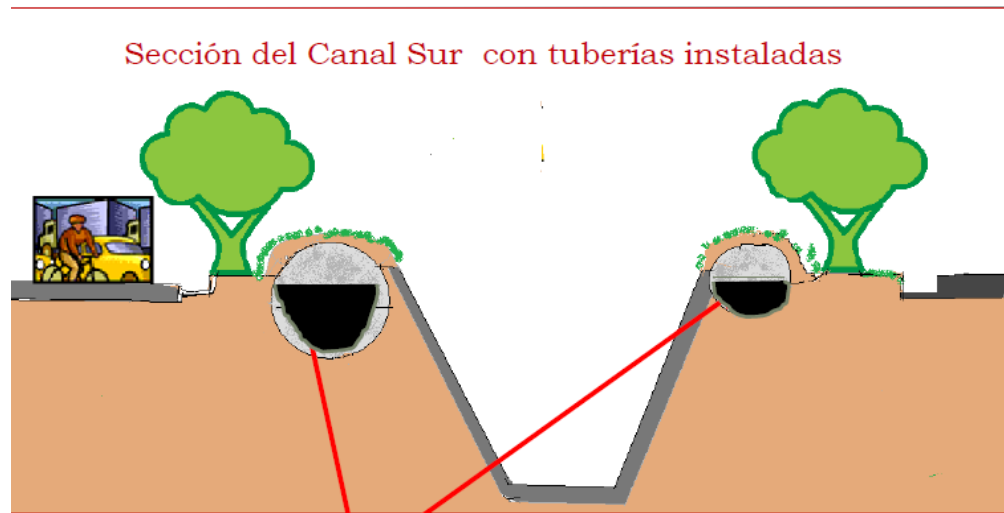
“Tuberías relativamente fáciles de instalar en las riberas del Canal Sur.”

Figura 12. Ubicación de las estaciones de bombeo.



Fuente: Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013

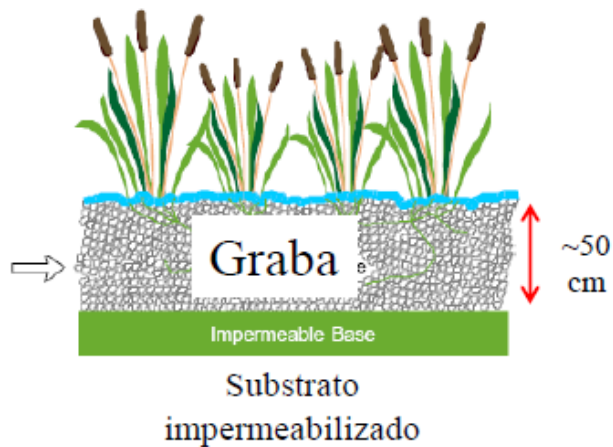
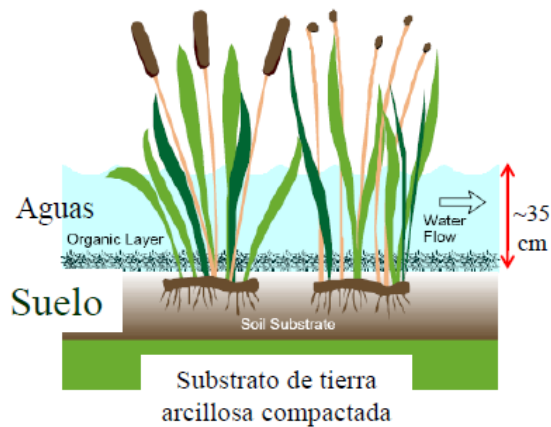
Figura 13. Mecanismo para la implementación de tuberías de transmisión de aguas residuales.



Fuente: Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013

Figura 14. Tipos de flujo.

FSLH: Flujo superficial libre Horizontal



FSSH: Flujo Sub-superficial Horizontal confinado

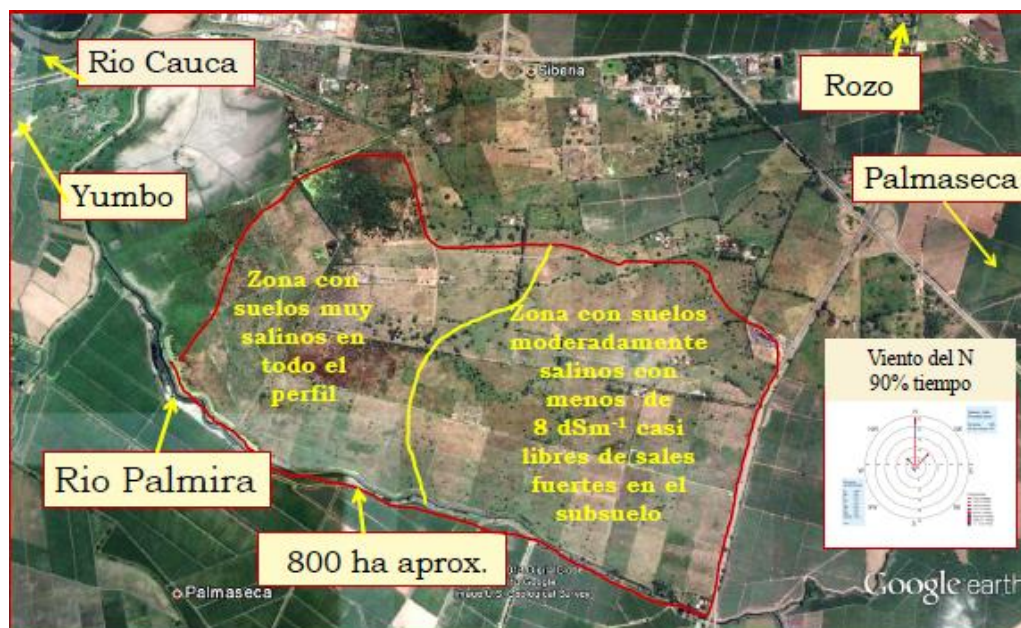
Fuente: Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013

Figura 15. Eficiencia de remoción de materia organica.

| Parametros                | Afluent<br>mg/l | Efluente<br>mg/l | Eficiencia de<br>remocion% |
|---------------------------|-----------------|------------------|----------------------------|
| Mat.Org. DBO <sub>5</sub> | 34,0            | 9,5              | 70                         |
| Sólidos Suspendidos       | 53,0            | 14,4             | 73                         |
| Nitrógeno N Total         | 14,3            | 8,4              | 52                         |
| Fósforo P Total           | 4,2             | 2,1              | 49                         |

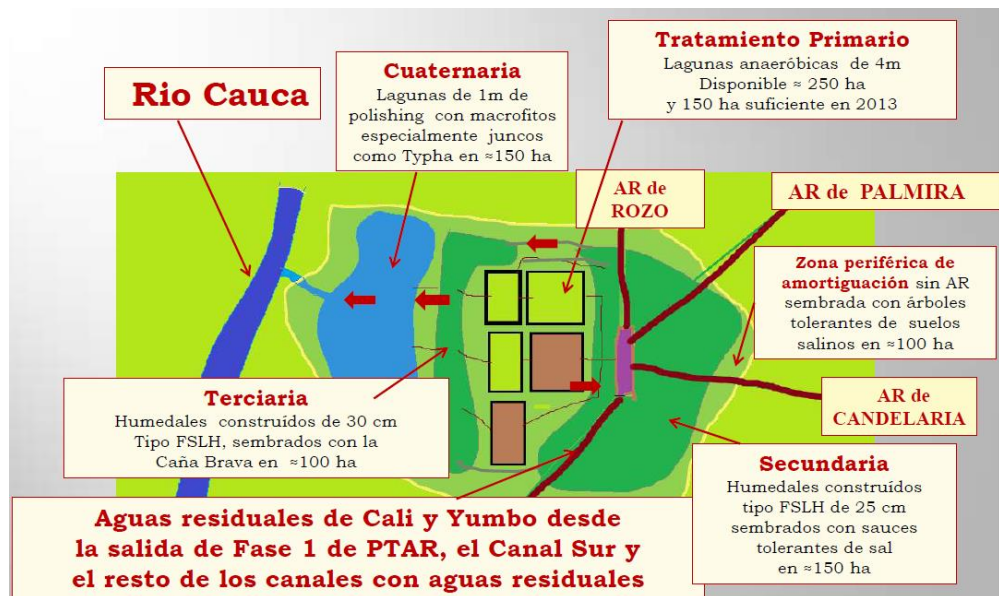
Fuente: Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013

Figura 16. Suelo necesarios para la implementación de la PTARR.



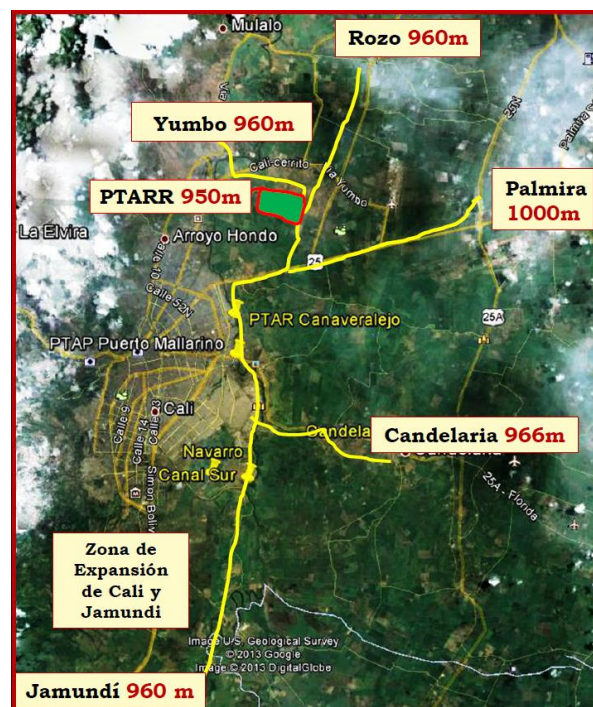
Fuente: Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013

Figura 17. Ilustración de la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales.



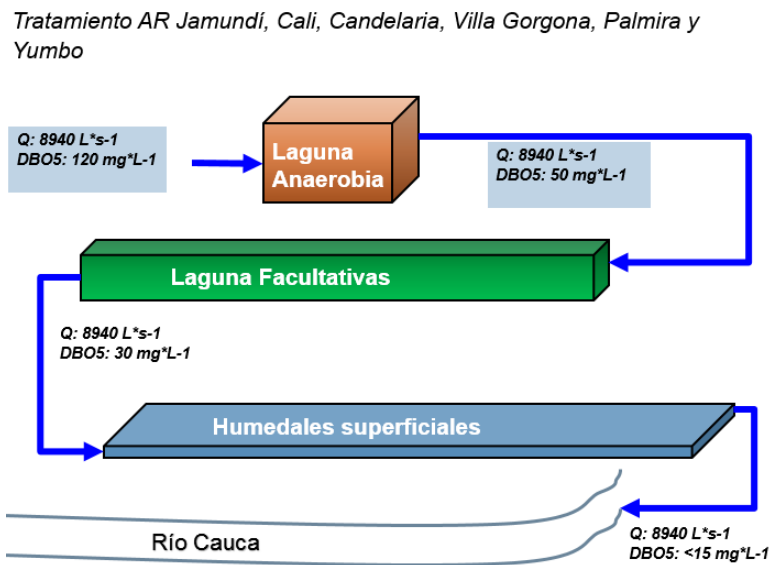
Fuente: Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013

Figura 18. Altura municipios.



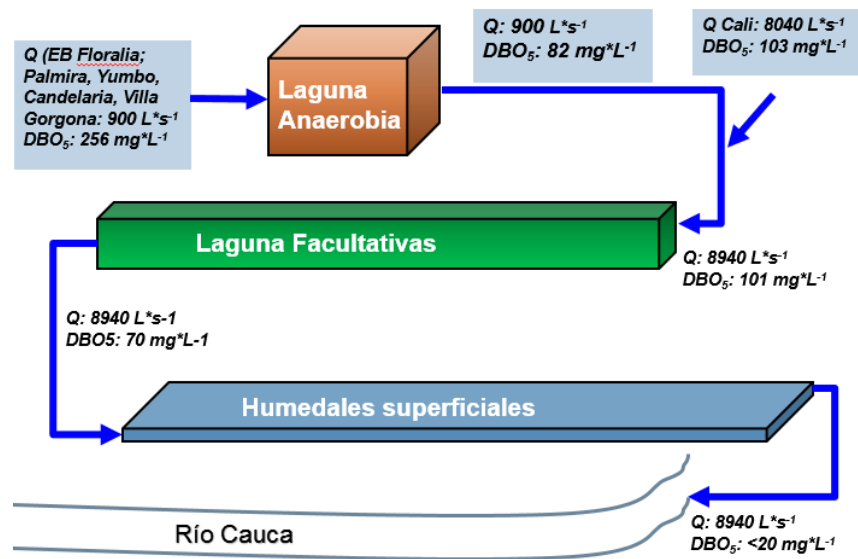
Fuente: Presentación del Proyecto en la Sociedad de Mejoras Públicas. Agosto de 2013

Figura 19. Alternativa de tratamiento A.



Fuente: Presentación “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales”. Andrés Toro, Enero (2014).

Figura 20. Alternativa de tratamiento B.



Fuente: Presentación “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales”. Andrés Toro, Enero (2014).

Figura 21. Diseño técnico de alternativa de tratamiento A.

**Datos de Entrada**

|                            |        |
|----------------------------|--------|
| Caudal (l/s)               | 8940   |
| Caudal (m <sup>3</sup> /d) | 772416 |
| DBO <sub>5</sub> (mg/L)    | 120    |
| Temperatura (°C)           | 24     |

|                    |      |
|--------------------|------|
| Número de Unidades | 8    |
| Profundidad (m)    | 4,5  |
| Talud              | 2    |
| Borde Libre, F (m) | 0,50 |

**Volumen de la Laguna:  $\nabla_{an}$**

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| $\lambda_v$ (g/m <sup>3</sup> ·d) | 580      |
| $\nabla_{an}$ (m <sup>3</sup> )   | 19976,28 |
| $\theta$ (d)                      | 0,2      |
| $\theta$ (d)                      | 1,00     |
| $\nabla_{an}$ (m <sup>3</sup> )   | 96552,00 |

Fuente: Presentación “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales”. Andrés Toro, Enero (2014).

Figura 22. Diseño técnico de alternativa de tratamiento B.

**Datos de Entrada**

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| Caudal (l/s)               | 900   |
| Caudal (m <sup>3</sup> /d) | 77760 |
| DBO <sub>5</sub> (mg/L)    | 256   |
| Temperatura (°C)           | 24    |

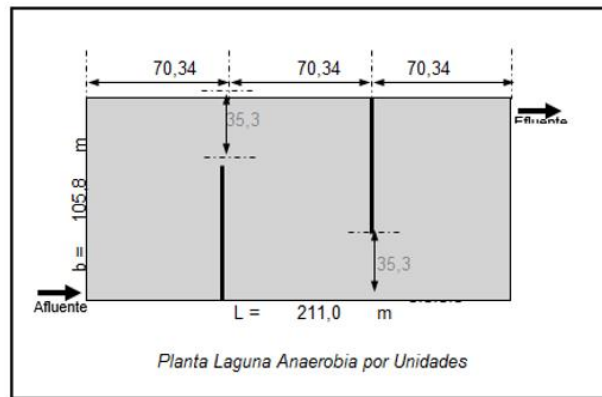
|                    |      |
|--------------------|------|
| Número de Unidades | 4    |
| Profundidad (m)    | 4,5  |
| Talud              | 2    |
| Borde Libre, F (m) | 0,50 |

**Volumen de la Laguna:  $\nabla_{an}$**

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| $\lambda_v$ (g/m <sup>3</sup> ·d) | 580      |
| $\nabla_{an}$ (m <sup>3</sup> )   | 8580,41  |
| $\theta$ (d)                      | 0,4      |
| $\theta$ (d)                      | 1,00     |
| $\nabla_{an}$ (m <sup>3</sup> )   | 19440,00 |

Fuente: Presentación “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales”. Andrés Toro, Enero (2014).

Figura 23. Diseño laguna anaeróbica de la alternativa A.

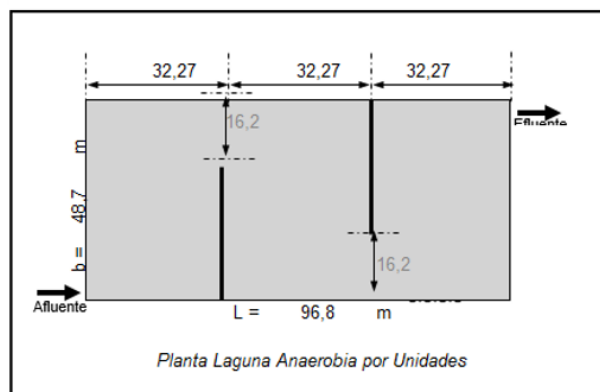


**Eficiencia de Remoción, %**

|                    |      |
|--------------------|------|
| % Remoción $DBO_5$ | 68,0 |
| $DBO_5$ Efluente   | 38,4 |

Fuente: Presentación “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales”. Andrés Toro, Enero (2014).

Figura 24. Diseño laguna anaeróbica de la alternativa B.

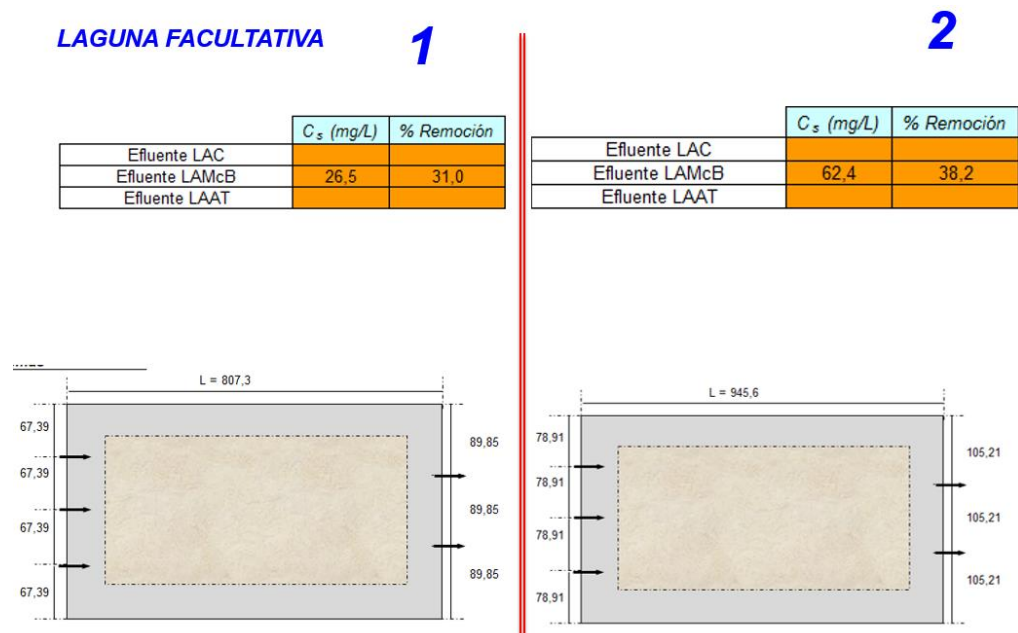


**Eficiencia de Remoción, %**

|                    |      |
|--------------------|------|
| % Remoción $DBO_5$ | 68,0 |
| $DBO_5$ Efluente   | 81,9 |

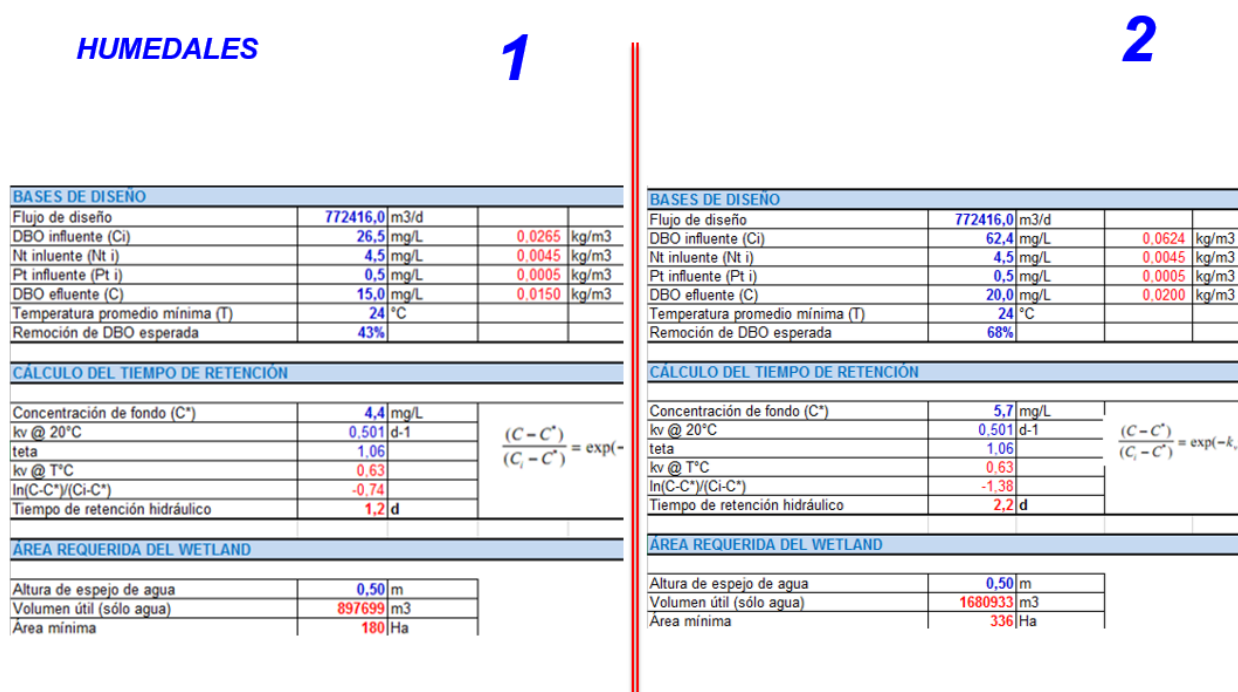
Fuente; Presentación “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de biorremediación de Aguas Residuales”. Andrés Toro, Enero (2014).

Figura 25. Diseño laguna facultativa la alternativa A y B.



Fuente: Presentación “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales”. Andrés Toro, Enero (2014).

Figura 26. Diseño humedales - alternativa A(1) y B(2).



Fuente: Presentación “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales”. Andrés Toro, Enero (2014).

#### Anexo B (Tablas)

Tabla 16. Valor de los elementos encontrados en el agua

| Parámetro               | Valor |
|-------------------------|-------|
| pH (un)                 | 9.09  |
| DBO <sub>5</sub> (mg/l) | 424   |
| DQO (mg/l)              | 3552  |
| Detergentes (mg/l)      | 2.08  |
| Color (UPC)             | 11745 |
| Arsénico (mg/l)         | 8.86  |
| Cianuro (mg/l)          | 5.39  |
| N-NH (mg/l)             | 546.7 |

Fuente: Viviana Valencia et. al. de Cinara en Lationosan 2007

Tabla 17. Caudal y carga orgánica para tratar en la alternativa A.

| Localidad        | Caudal (L/s) | DBO (mg/L) |
|------------------|--------------|------------|
| EB Floralia      | 85           | 297        |
| Canal Sur        | 1376         | 138        |
| EB Pto Mallarino | 563,3        | 94,3       |
| PTAR-C           | 6100         | 96,12      |
| Palmira          | 500          | 330        |
| Yumbo            | 113          | 310        |
| Candelaria       | 15,3         | 316        |
| Jamundí          | 142          | 250        |
| Villa Gorgona    | 45           | 150        |
| <b>Totales</b>   | <b>8940</b>  | <b>119</b> |

Fuente: Presentación “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales”. Andrés Toro, Enero (2014).

Tabla 18. Caudal y carga orgánica para tratar en la alternativa B.

| Localidad      | Caudal (L/s) | DBO (mg/L) |
|----------------|--------------|------------|
| EB Floralia    | 85           | 297        |
| Palmira        | 500          | 330        |
| Yumbo          | 113          | 310        |
| Candelaria     | 15,3         | 316        |
| Jamundí        | 142          | 250        |
| Villa Gorgona  | 45           | 150        |
| <b>Totales</b> | <b>900</b>   | <b>256</b> |

| Localidad        | Caudal (L/s) | DBO (mg/L) |
|------------------|--------------|------------|
| Canal Sur        | 1376         | 138        |
| EB Pto Mallarino | 563,3        | 94,3       |
| PTAR-C           | 6100         | 96,12      |
| <b>Totales</b>   | <b>8039</b>  | <b>103</b> |

Fuente: Presentación “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales”. Andrés Toro, Enero (2014).

Tabla 19. Costos generales Lagunas Anaerobias

| Costos Generales - Lagunas Anaerobias - \$ Pesos |                             |                            |
|--------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|                                                  | Alternativa 1               | Alternativa 2              |
| Excavación Total                                 | \$ 1.603.070.352,00         | \$ 196.350.091,20          |
| Nivelación                                       | \$ 69.484.272,00            | \$ 4.672.819,20            |
| Piedras - con colocación                         | \$ 1.789.292.594,79         | \$ 439.619.840,32          |
| <b>Total</b>                                     | <b>\$ 3.461.847.218,79</b>  | <b>\$ 640.642.750,72</b>   |
| Sitio (Natural) Dique                            |                             |                            |
| Relleno tierra                                   | \$ 2.501.697.536,00         | \$ 614.690.816,00          |
| Acarreo                                          | \$ 1.443.850.824,00         | \$ 354.767.844,00          |
| Perfilación Taludes                              | \$ 85.060.357,53            | \$ 21.092.934,56           |
| Conformación y Compactación                      | \$ 31.041.402,47            | <b>\$ 4.712.129,37</b>     |
| <b>Total</b>                                     | <b>\$ 4.061.650.119,99</b>  | \$ 995.263.723,93          |
| Núcleo                                           |                             |                            |
| Acarreo                                          | \$ 159.239.040,00           | \$ 39.124.200,00           |
| Relleno de Arcilla                               | \$ 801.853.440,00           | \$ 197.011.200,00          |
| Conformación y Compactación                      | \$ 3.394.944,00             | \$ 834.120,00              |
| 15% de relleno de arcilla por compactación       | \$ 120.278.016,00           | <b>\$ 29.551.680,00</b>    |
| <b>Total</b>                                     | <b>\$ 1.084.765.440,00</b>  | \$ 266.521.200,00          |
| Otros                                            |                             |                            |
| Geomembrana                                      | \$ 950.950.900,94           | \$ 144.355.709,25          |
| Empradizarían                                    | \$ 4.808.564,44             | \$ 2.447.018,89            |
| <b>Costos totales</b>                            |                             |                            |
| Total para todas las lagunas                     | \$ 9.564.022.244,16         | <b>\$ 2.049.230.402,78</b> |
| Aumento 25% por otros gastos, y administración   | \$ 2.391.005.561,04         | \$ 512.307.600,69          |
| Aumento 20% obras adicionales o complementarias  | \$ 2.391.005.561,04         | \$ 512.307.600,69          |
| <b>Total costo en pesos</b>                      | <b>\$ 14.346.033.366,25</b> | <b>\$ 3.073.845.604,17</b> |
| Total costo en dólares*                          | <b>\$ 7.430.790,82</b>      | <b>\$ 1.592.154,65</b>     |
| Costo por laguna en dólares*                     | \$ 928.848,85               | \$ 398.038,66              |

Fuente: Cálculos propios.

Tabla 20. Costos generales Lagunas Facultativa

| Costos Generales - Lagunas Facultativas - \$ Pesos |                     |                     |
|----------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
|                                                    | Alternativa 1       | Alternativa 2       |
| Excavación Total                                   | \$ 3.732.675.706,37 | \$ 5.099.882.204,16 |
| Nivelación                                         | \$ 898.158.792,96   | \$ 1.236.755.627,52 |
| Piedras - con colocación                           | \$ -                | \$ -                |

|                                                 |                             |                             |
|-------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>Total</b>                                    | <b>\$ 4.630.834.499,33</b>  | <b>\$ 6.336.637.831,68</b>  |
| Sitio (Natural). Dique                          |                             |                             |
| Relleno tierra                                  | \$ 1.296.977.117,18         | \$ 1.516.860.112,90         |
| Acarreo                                         | \$ 748.548.316,66           | \$ 875.453.444,06           |
| Perfilación Taludes                             | \$ 95.387.266,92            | \$ 111.514.002,41           |
| Conformación y Compactación                     | \$ 229.810.174,17           | \$ 313.060.125,20           |
| <b>Total</b>                                    | <b>\$ 2.370.722.874,93</b>  | <b>\$ 2.816.887.684,57</b>  |
| Núcleo                                          |                             |                             |
| Acarreo                                         | \$ 185.128.433,28           | \$ 216.511.384,32           |
| Relleno de Arcilla                              | \$ 932.220.334,08           | \$ 1.090.250.219,52         |
| Conformación y Compactación                     | \$ 3.946.900,61             | \$ 4.615.978,75             |
| 15% de relleno de arcilla por compactación      | \$ 932.220.334,08           | \$ 1.090.250.219,52         |
| <b>Total</b>                                    | <b>\$ 2.053.516.002,05</b>  | <b>\$ 2.401.627.802,11</b>  |
| Otros                                           |                             |                             |
| Geomembrana                                     | \$ 7.040.216.446,76         | \$ 9.590.572.089,60         |
| Empradización                                   | \$ 5.075.047,06             | \$ 5.925.980,24             |
| Total para todas las lagunas                    | \$ 16.100.364.870,13        | \$ 21.151.651.388,20        |
| Aumento 25% por otros gastos, y administración  | \$ 4.025.091.217,53         | \$ 5.287.912.847,05         |
| Aumento 20% obras adicionales o complementarias | \$ 4.025.091.217,53         | \$ 5.287.912.847,05         |
| <b>Total costo en pesos</b>                     | <b>\$ 24.150.547.305,19</b> | <b>\$ 31.727.477.082,30</b> |
| Total costo en dólares*                         | <b>\$ 12.509.218,44</b>     | <b>\$ 16.433.828,04</b>     |
| Costo por laguna en dólares*                    | \$ 1.563.652,31             | \$ 2.054.228,50             |

Fuente: Cálculos propios.

Tabla 21. Costos generales Humedales

| Costos Generales - Humedales - \$ Pesos |                            |                             |
|-----------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|                                         | Alternativa 1              | Alternativa 2               |
| Excavación Total                        | \$ 4.698.000.000,00        | \$ 8.769.756.600,00         |
| Nivelación                              | \$ 952.569.530,00          | \$ 1.778.883.520,00         |
| Piedras - con colocación                | \$ -                       | \$ -                        |
| <b>Total</b>                            | <b>\$ 5.650.569.530,00</b> | <b>\$ 10.548.640.120,00</b> |
| Sitio (Natural). Dique                  |                            |                             |
| Relleno tierra                          | \$ 27.648.000,00           | \$ 37.652.480,00            |
| Acarreo                                 | \$ 15.957.000,00           | \$ 21.731.070,00            |
| Perfilación Taludes                     | \$ 3.985.200,00            | \$ 5.427.252,00             |
| Conformación y Compactación             | \$ 227.140.326,00          | \$ 423.830.988,00           |
| <b>Total</b>                            | <b>\$ 274.730.526,00</b>   | <b>\$ 488.641.790,00</b>    |
| Otros                                   |                            |                             |
| Geomembrana                             | \$ 6.958.425.860,00        | \$ 12.984.028.680,00        |

|                                                 |                             |                             |
|-------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Sauces                                          | \$ 2.700.000,00             | \$ 5.040.000,00             |
| Juncos                                          | \$ 72.000.000,00            | \$ 134.400.000,00           |
| Caña brava                                      | \$ 3.600.000,00             | \$ 6.720.000,00             |
| <b>Total</b>                                    | <b>\$ 7.036.725.860,00</b>  | <b>\$ 13.130.188.680,00</b> |
| Total para todas las lagunas                    | \$ 12.962.025.916,00        | \$ 24.167.470.590,00        |
| Aumento 25% por otros gastos, y administración  | \$ 3.240.506.479,00         | \$ 6.041.867.647,50         |
| Aumento 20% obras adicionales o complementarias | \$ 3.240.506.479,00         | \$ 6.041.867.647,50         |
| <b>Total costo en pesos</b>                     | <b>\$ 19.443.038.874,00</b> | <b>\$ 36.251.205.885,00</b> |
| Total costo en dólares*                         | <b>\$ 10.070.878,20</b>     | <b>\$ 18.776.976,25</b>     |

Fuente: Cálculos propios.

Tabla 22. Costo del terreno.

| Costo Terreno - \$ Pesos |                     |                      |
|--------------------------|---------------------|----------------------|
| Fase                     | Alternativa 1       | Alternativa 2        |
| Lagunas Anaerobias       | \$ 900.831.360      | \$ 110.337.216       |
| Lagunas Facultativas     | \$ 7.865.791.718    | \$ 10.746.878.208    |
| Humedales                | \$ 7.920.000.000    | \$ 14.784.000.000    |
| Total en pesos           | \$ 16.686.623.078   | \$ 25.641.215.424    |
| Total en dólares*        | <b>\$ 9.270.346</b> | <b>\$ 14.245.120</b> |

Fuente: Cálculos propios.

Tabla 23. Costos de tuberías sin instalación

| Costos de Tuberías sin instalación - *Incluye IVA |                         |                     |                     |                     |                      |                 |
|---------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| Cobertura                                         | Conexión A              | Conexión B          | Conexión C          | Conexión D          | Total pesos          | Total dólares   |
| Región                                            | \$ 2.081.153.76<br>9,23 | \$ 2.044.142.184,62 | \$ 1.698.221.475,69 | \$ 6.272.288.913,85 | \$ 12.095.806.343,38 | \$ 6.265.244,50 |

Fuente: cálculos propios

Conexiones: A) Efluente de la PTAR Cañaveralejo bombeada directamente hasta la PTARR Palmaseca. B) Tuberías instalas encima del nuevo jarillón del río Cauca e interconectando la estación de bombeo del Canal Sur, Puerto Mallarino,

Floraria, Puente del Comercio. C) Puente del Comercio hasta PTARR Palmaseca. D) Conexiones entres Rozo, Yumbo, Palmira, Candelaria, Jamundí, hasta la PTARR.

Tabla 24. Eficiencia de alternativas del proyecto

|                                                                                      | Carga Inicial A |           | Lagunas Anaerobias |           | Carga Inicial B |           | Laguna Facultativa |           | Humedales superficiales |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|--------------------|-----------|-----------------|-----------|--------------------|-----------|-------------------------|---------------|
| <b>Alternativas</b>                                                                  | Cant. L/s       | DBO5 mg/L | Cant. L/s          | DBO5 mg/L | Cant. L/s       | DBO5 mg/L | Cant. L/s          | DBO5 mg/L | Cant. L/s               | DBO5 mg/L     |
| Tratamiento de aguas residuales de forma conjunta de todos los municipios propuestos | 8940            | 120       | 8940               | 50        | 0               | 0         | 8940               | 30        | <b>8940</b>             | <b>&lt;15</b> |
| Tratamiento de aguas residuales de forma separada                                    | 900             | 256       | 8940               | 101       | 8040            | 103       | 8940               | 70        | <b>8940</b>             | <b>&lt;20</b> |

Fuente: Presentación “Diseño de Alternativas para la Planta Regional de Biorremediación de Aguas Residuales”. Andrés Toro, Enero (2014).

Tabla 25. Precios cuenta

| Precios cuenta - Precios Sociales a utilizar en la evaluación del proyecto |               |                     |                     |                  |  |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|---------------------|------------------|--|
| Concepto                                                                   | 2014          | Razón precio cuenta | Precio cuenta final | Unidad de medida |  |
| Excavación tierra conglomerado                                             | \$ 2.666,90   | 0,79                | \$ 2.106,85         | M3               |  |
| Relleno tierra seleccionada in situ 90%                                    | \$ 1.596,05   | 0,79                | \$ 1.260,88         | M3               |  |
| Perfilación de taludes                                                     | \$ 754,09     | 0,8                 | \$ 603,27           | M2               |  |
| Conformación y compactación                                                | \$ 128,75     | 0,9                 | \$ 115,87           | M2               |  |
| Equipo de bombeo para excavación                                           | \$ 236.546,70 | 0,9                 | \$ 212.892,03       | Mes              |  |
| Acarreo materiales campero-camioneta                                       | \$ 6.038,84   | 0,9                 | \$ 5.434,95         | M3K              |  |
| Piedras                                                                    | \$ 71.526,00  | 0,79                | \$ 56.505,54        | M3               |  |
| Configuración-nivelación-terreno                                           | \$ 541,55     | 0,79                | \$ 427,83           | M2               |  |
| Retiro Mat. Excava. A maquina (sin transp)                                 | \$ 3.269,76   | 0,8                 | \$ 2.615,81         | M3               |  |
| Relleno material sitio compactado 90% PM                                   | \$ 10.463,23  | 0,79                | \$ 8.265,95         | M3               |  |
| Geombrana polietileno alta densidad                                        | \$ 3.944,15   | 0,78                | \$ 3.076,44         | M2               |  |
| Empradización talud exterior diques                                        | \$ 163,49     | 0,6                 | \$ 98,09            | M2               |  |
| Arcilla (Propuesto)                                                        | \$ 30.408,77  | 0,79                | \$ 24.022,93        | M3               |  |
| Transp. Tub HR D=33 hasta 36"                                              | \$ 449,59     | 0,6                 | \$ 269,76           | M/K              |  |
| Instalación TUB.PVC UM 12 RDE 26                                           | \$ 186.233,27 | 0,6                 | \$ 186.233,27       | ML               |  |

|          |                  |   |                  |    |
|----------|------------------|---|------------------|----|
| Terrenos | \$ 40.000.000,00 | 1 | \$ 40.000.000,00 | HA |
|----------|------------------|---|------------------|----|

Fuente: cálculos propios

Tabla 26. Resultados obtenidos de la evaluación del proyecto – Post Factibilidad

| Resultados obtenidos de la evaluación de los proyectos |                   |                             |                               |                                 |
|--------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Proyecto                                               | Costo estimado*   | Índice Costo - Efectividad* | Población Beneficiada futura* | % de remoción de carga orgánica |
| Alternativa A                                          | \$ 63.258.533,28  | \$ 9,45                     | 3.543.441                     | 87%                             |
| Alternativa B                                          | \$ 73.595.072,29  | \$ 10,99                    | 3.543.441                     | 83%                             |
| Fase II - PTAR                                         | \$ 192.000.000,00 | \$ 36,43                    | 2.776.456                     | 85%                             |

Fuente: cálculos propios

### Anexo C (Hojas de cálculo)

Este anexo se encuentra en el CD adjunto a este trabajo. Contiene archivos correspondientes a las tablas detalladas para realizar los cálculos de los costos de cada componente del proyecto, al igual que el ejemplo de estudios de factibilidad. Estos archivos son:

- Un análisis del proyecto – TRM calculada
- Estimación con costos actualizados al RPC (Relación Precio Cuenta)
- Estimación con costos sin RPC