



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

FACULTAD DE QUÍMICA

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA  
FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES  
DENTRO DEL MARCO DE DESARROLLO SUSTENTABLE**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA DE SISTEMAS – INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN DE  
PROYECTOS

P R E S E N T A

**GILMARTH RICARDO SUÁREZ DE AQUÍZ**

TUTOR:

**Dr. ALFONSO DURÁN MORENO**

**2005**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M en C. ALEJANDRO ANAYA DURAND

Secretario: Dr. ROBERTO DEL RÍO SOTO

Vocal: Dr. ALFONSO DURÁN MORENO

1<sup>er</sup>. Suplente: M en C. LETICIA LOZANO RÍOS

2<sup>do</sup>. Suplente: M en A. FERNANDO BÁEZ RAMOS

Lugar donde se realizó la tesis:

MÉXICO, DISTRITO FEDERAL

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. ALFONSO DURÁN MORENO

---

**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco infinitamente y de todo corazón a Paulina y Luis Felipe, mis padres, por el apoyo y el amor que me han brindado de manera incondicional. A Mercedes, Luisa y Félix, mis hermanos, por su amor y sus sonrisas siempre oportunas y necesarias, y para quienes la unión familiar es un sentimiento fundamental en la vida.

Deseo manifestar mi especial gratitud por el incalculable apoyo y guía que me brindó el Dr. Alfonso Durán Moreno, el cual contribuyó en gran medida al buen término de este esfuerzo.

De la misma forma, deseo expresar mi gratitud a los jurados de tesis M. en C. Leticia Lozano, M. en C. Alejandro Anaya, M. en A. Fernando Báez, Dr. Roberto del Río y Dr. Alfonso Durán Moreno, ya que gracias a sus aportes se logró enriquecer el trabajo realizado.

Deseo expresar mi agradecimiento a mis amigos y a aquellas personas que inconscientemente he omitido en estas palabras, que contribuyeron de diferentes maneras a hacer de esta idea una realidad.

Finalmente le doy gracias a Dios por todo en mi vida, y a Alexandra Milena por ser mi amor, mi compañera y mi apoyo, especialmente durante la realización de este trabajo y mi estadía en México.

*A la memoria del Dr. Julio Ricardo Landgrave Romero y de Ana Julia,  
para quien el conocimiento que brinda el estudio era su mayor dicha.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
OBJETIVO GENERAL.....	11
HIPÓTESIS .....	12
METAS .....	12
METODOLOGÍA.....	13
<b>CAPITULO 1. ANTECEDENTES GENERALES DEL ESTADO DEL AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO .....</b>	<b>15</b>
1.1 EL AGUA POTABLE Y EL SANEAMIENTO BÁSICO EN AMÉRICA LATINA .....	15
1.2 ESTADO DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO EN COLOMBIA.....	19
1.2.1 Aspectos demográficos relacionados con el agua potable y saneamiento básico ...	19
1.2.2 Disposición y cobertura de tratamiento de los residuos líquidos en el país.....	22
<b>CAPÍTULO 2. DESARROLLO SOSTENIBLE Y POLÍTICA AMBIENTAL DE DESCONTAMINACIÓN HÍDRICA EN COLOMBIA .....</b>	<b>24</b>
2.1 RELACIÓN ENTRE DESARROLLO SOSTENIBLE Y DESCONTAMINACIÓN HÍDRICA	24
2.2 SOSTENIBILIDAD EN LA POLÍTICA GENERAL DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO .....	25
2.3 ASPECTOS LEGALES, INSTITUCIONALES Y FINANCIEROS EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS AMBIENTALES .....	26
<b>CAPÍTULO 3. SITUACIÓN HÍDRICA DE LOS MUNICIPIOS DEL CORREDOR INDUSTRIAL DE BOYACÁ .....</b>	<b>30</b>
3.1 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN HÍDRICA .....	30
3.1.1 Cuantificación de la demanda hídrica y usos del agua .....	30
3.1.2 Oferta hídrica para el abastecimiento municipal .....	31
3.1.3 Proyecciones de demanda y oferta para los años 2015 y 2025 .....	32
3.1.4 La problemática hídrica del departamento de Boyacá .....	36
3.1.5 Alternativas generales de solución para la problemática hídrica del departamento de Boyacá .....	39
3.2 ANÁLISIS DEL NIVEL DE PRIORIDAD DE LOS MUNICIPIOS.....	41
3.2.1 Estimación del índice de escasez.....	42
3.2.2 Estimación del caudal generado de aguas residuales municipales .....	42
3.2.3 Carga y concentraciones de materia orgánica aportadas por los municipios al río Chicamocha .....	44
3.2.4 Prioridad de desarrollo hídrico-ambiental .....	45
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS .....</b>	<b>49</b>
4.1 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA .....	49
4.1.1 Aspectos técnicos del proceso .....	51
4.1.2 Aspectos técnicos complementarios .....	52
4.1.3 Aspectos económico-financieros .....	53
4.1.4 Aspectos contractuales.....	54
4.1.5 Aspectos plausibles .....	55
4.1.6 Aspectos estratégico-tácticos .....	56
4.1.7 Aspectos normativos.....	57
4.2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN .....	57
<b>CAPÍTULO 5. DESARROLLO DEL CASO DE ESTUDIO.....</b>	<b>64</b>
5.1 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS.....	64
5.1.1 Definición de los aspectos a considerar en la evaluación (Ai) .....	65

5.1.2	<i>Identificación de los subaspectos o factores restrictivos</i> .....	65
5.1.3	<i>Decisión del tipo de evaluación</i> .....	66
5.1.4	<i>Desarrollo de la técnica matricial de evaluación</i> .....	67
5.1.5	<i>Selección de los subaspectos y factores para cada aspecto</i> .....	67
5.1.6	<i>Asignación de los puntajes o pesos para los subaspectos y/o factores de cada aspecto</i> .....	68
5.1.7	<i>Asignación de la escala de calificación</i> .....	69
5.1.8	<i>Calificación de los factores considerados usando la escala descrita</i> .....	69
5.1.9	<i>Generación de la matriz de resultados de la evaluación</i> .....	69
5.1.10	<i>Selección de la tecnología</i> .....	71
5.2	<b>DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO EMPLEANDO LA ALTERNATIVA TECNOLÓGICA SELECCIONADA</b> .....	71
5.2.1	<i>Características del agua residual objeto de tratamiento</i> .....	71
5.2.2	<i>Descripción del proceso de tratamiento empleado</i> .....	73
5.3	<b>DIMENSIONAMIENTO DE LAS UNIDADES DE TRATAMIENTO</b> .....	77
5.3.1	<i>Desarenador de flujo horizontal</i> .....	78
5.3.2	<i>Sedimentador primario</i> .....	78
5.3.3	<i>Reactor de aireación</i> .....	81
5.3.4	<i>Clarificador secundario</i> .....	82
5.3.5	<i>Espesador por gravedad</i> .....	85
5.3.6	<i>Digestor anaerobio de lodos</i> .....	85
5.4	<b>DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO Y BALANCE DE MASA</b> .....	88
5.5	<b>ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN REQUERIDA</b> .....	90
5.6	<b>EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO</b> .....	94
5.6.1	<i>Criterios empleados para la evaluación financiera</i> .....	94
5.6.2	<i>Estimación de los costos de operación y mantenimiento anuales</i> .....	95
5.6.3	<i>Estimación del valor de pago anual de la inversión</i> .....	96
5.6.4	<i>Cálculo del beneficio generado</i> .....	97
5.6.5	<i>Balance anual de flujos de efectivo y Tasa Interna de Retorno</i> .....	98
5.7	<b>PROGRAMA DE EJECUCIÓN</b> .....	101
5.8	<b>HOJA TÉCNICA, ECONÓMICA Y SOCIAL DEL PROYECTO</b> .....	109
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>111</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>117</b>
	ANEXO 1. ESTRUCTURA DEL SISTEMA NACIONAL AMBIENTAL S/NA EN COLOMBIA ..	118
	ANEXO 2. CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA Y SALIDA DEL AGUA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE TUNJA .....	119
	ANEXO 3. ARREGLO DE PLANTA. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE TUNJA – COLOMBIA .....	119
	ANEXO 4. DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTOS. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE TUNJA – COLOMBIA .....	119
	ANEXO 5. NORMA COLOMBIANA DE VERTIMIENTO PARA DESCARGAS ORGÁNICAS SEGÚN DECRETO 1594/84.....	123
	ANEXO 6. FUNDAMENTOS DE LA CALIFICACIÓN EN EL CASO DE ESTUDIO .....	124
	ANEXO 7. SIMBOLOGÍA EMPLEADA EN LOS CÁLCULOS DE DISEÑO DE EQUIPO .....	128
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>129</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de la población urbana y rural en Colombia.....	21
Tabla 2. Coberturas urbanas de acueducto y alcantarillado por rangos municipales .....	21
Tabla 3. Distribución de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en Colombia .....	23
Tabla 4. Dimensiones de sustentabilidad en la política de agua potable y saneamiento básico de Colombia.....	26
Tabla 5. Instrumentos de financiación de proyectos de tratamiento de aguas residuales en Colombia.....	28
Tabla 6. Demanda de agua por diversos conceptos para el año 2000.....	31
Tabla 7. Índices de escasez y vulnerabilidad para los municipios del CIB. Condiciones hidrológicas de año medio y seco .....	32
Tabla 8. Proyecciones para los años 2015 y 2025 del índice de escasez de los municipios del CIB.....	33
Tabla 9. Índices de escasez para los municipios del CIB para el año 2015 bajo condiciones hidrológicas de años seco .....	42
Tabla 10. Porcentaje de cobertura de alcantarillado urbano 1998 por distribución de población	43
Tabla 11. Estimado de flujo de aguas residuales para el año 2015 para los municipios del CIB	43
Tabla 12. Estimado de carga y concentraciones de DBO <sub>5</sub> a lo largo de la cuenca alta del río Chicamocha .....	44
Tabla 13. Matriz de variables de selección para los municipios del Corredor Industrial de Boyacá .....	45
Tabla 14. Calificaciones para la influencia de los criterios en la selección.....	46
Tabla 15. Pesos asignados a los criterios de selección.....	46
Tabla 16. Rangos y peso de los criterios de selección .....	47
Tabla 17. Matriz de valoración para las alternativas de selección.....	47
Tabla 18. Resultado de la ponderación de las calificaciones para las alternativas .....	47
Tabla 19. Aspectos a considerar en la evaluación.....	59
Tabla 20. Aspecto: "evaluación técnica del proceso".....	60
Tabla 21. Escala de calificación de atributos .....	62
Tabla 22. Matriz de evaluación final de alternativas tecnológicas .....	63
Tabla 23. Aspectos considerados en la evaluación de las alternativas .....	65
Tabla 24. Subfactores o filtros restrictivos considerados para la evaluación .....	66
Tabla 25. Cumplimiento de las alternativas con los criterios restrictivos o filtros .....	66
Tabla 26. Peso asignado a casa aspecto considerado.....	67
Tabla 27. Subaspectos y/o factores considerados para cada aspecto.....	67
Tabla 28. Pesos asignados a los subaspectos y/o factores para cada aspecto utilizado .....	68
Tabla 29. Determinación de la escala de calificación .....	69
Tabla 30. Matriz de resultados de la aplicación de la evaluación de las alternativas tecnológicas .....	69
Tabla 31. Distribución de caudales y concentraciones de DBO <sub>5</sub> en la cuenca alta del río Chicamocha .....	71
Tabla 32. Estimación de las concentraciones de parámetros del agua negra de la ciudad de Tunja .....	73
Tabla 33. Información usual sobre las características y cantidades de residuos del tamizado grueso removidos con ayuda de rejillas .....	74
Tabla 34. Información usual sobre las características y cantidades de residuos generados en el tamizado de agua residual con rejillas finas y tamices de plato perforado .....	75

Tabla 35. Subdivisiones de los procesos biológicos aerobio y anaerobio .....	76
Tabla 36. Criterios de diseño para el desarenador .....	78
Tabla 37. Criterios de diseño para el sedimentador primario .....	79
Tabla 38. Memoria de cálculo del desarenador. ....	79
Tabla 39. Memoria de cálculo del sedimentador primario .....	80
Tabla 40. Criterios de diseño para el reactor aerobio .....	81
Tabla 41. Criterios de diseño para el clarificador secundario .....	82
Tabla 42. Memoria de cálculo del reactor de aireación .....	82
Tabla 43. Memoria de cálculo para el clarificador secundario .....	85
Tabla 44. Criterios de diseño para el espesador de lodos por gravedad.....	86
Tabla 45. Memoria de cálculo del espesador de lodos por gravedad.....	86
Tabla 46. Criterios de diseño para el digestor anaerobio .....	87
Tabla 47. Memoria de cálculo del digestor anaerobio.....	87
Tabla 48. Estimado de costo de equipo principal instalado e inversión de capital fijo .....	93
Tabla 49. Estimado de los costos de operación y mantenimiento .....	96
Tabla 50. Estimación del valor de amortización de la inversión .....	97
Tabla 51. Cálculo del beneficio generado por reducción en pago de tasas retributivas.....	98
Tabla 52. Balance anual de flujos de efectivo .....	99
Tabla 53. Flujo de efectivo adicional por año para alcanzar el costo de oportunidad del 12% ....	99

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo empleada .....	14
Ilustración 2. Proyecciones del índice de escasez en Colombia. ( <i>Fuente:</i> Ministerio del Medio Ambiente. IDEAM Colombia, Estudio Nacional del Agua IDEAM 2000, Bogotá). .....	34
Ilustración 3. Índices de escasez y vulnerabilidad en los municipios colombianos para el año 2000. ( <i>Fuente:</i> Ministerio del Medio Ambiente. IDEAM Colombia, Estudio Nacional del Agua IDEAM 2000, Bogotá). .....	36
Ilustración 4. Identificación de la problemática, necesidades y alternativas, para la situación de Saneamiento Básico en el Corredor Industrial de Boyacá. ....	38
Ilustración 5. Alternativas generales de solución a la problemática de escasez de agua fresca en el Corredor Industrial de Boyacá .....	40
Ilustración 6. Ubicación geográfica del Corredor Industrial de Boyacá y de la Cuenca Alta del río Chicamocha. ....	41
Ilustración 7. Diagrama conceptual del tratamiento del agua residual municipal para la ciudad de Tunja, Colombia. ....	74
Ilustración 8. Diagrama de flujo de proceso y cuadro de balance de masa para la planta de tratamiento de aguas residuales.....	89
Ilustración 9. Diagrama de red de proyecto empleando fechas de programación. ( <i>Fuente:</i> Project Management Institute, <i>A Guide to the Project Management Body of Knowledge</i> , PMI Publishing Division, USA,1996) .....	102
Ilustración 10. Diagrama de barras de Gantt. ( <i>Fuente:</i> Project Management Institute, <i>A Guide to the Project Management Body of Knowledge</i> , PMI Publishing Division, USA,1996) .....	103
Ilustración 11. Carta de fechas clave del proyecto. ( <i>Fuente:</i> Project Management Institute, <i>A Guide to the Project Management Body of Knowledge</i> , PMI Publishing Division, USA,1996) .....	103
Ilustración 12. Diagrama de red con escala de tiempo. ( <i>Fuente:</i> Project Management Institute, <i>A Guide to the Project Management Body of Knowledge</i> , PMI Publishing Division, USA, 1996) .....	104
Ilustración 13. Diagrama de Gantt de las actividades del proyecto de construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Tunja-Colombia. ....	105

# INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por objeto proponer una estructura base para la concepción, evaluación de viabilidad y diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales. Se seleccionó como caso de estudio la ciudad de Tunja, Colombia, por representar una ciudad con altos índices de escasez y un rezago importante en el desarrollo de infraestructura de tratamiento de aguas residuales, aunado al Proceso de Concertación para la Descontaminación de la cuenca alta<sup>1</sup> del río Chicamocha, llevado a cabo por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá en el marco del programa de Cooperación Horizontal del Ministerio del Medio Ambiente de Colombia.

En ciudades como Tunja, la reducción en la disponibilidad de agua fresca consecuencia de la contaminación de las fuentes, junto con los altos índices de escasez que presenta esta región del país, al igual que algunas regiones de América Latina, hacen que comunidades enteras se encuentren cada vez más vulnerables ante el brote de alguna enfermedad generada por organismos patogénicos presentes en el agua residual. En el caso de desarrollarse una enfermedad de éste tipo, se presentarían serios problemas de salud pública. Estos problemas generan consecuencias que afectan de manera sensible a sectores sociales y económicos, que se ven reflejadas en el aumento de los costos en atención curativa y preventiva de la salud pública, la reducción en el turismo y las prohibiciones temporales de las exportaciones de productos alimenticios, que tratándose de países principalmente agrícolas, constituye en un factor importante de reducción del ingreso de la nación.

Esta condición genera atraso en el desarrollo económico de la región, estimula el aumento en los índices de pobreza y lleva a un agotamiento progresivo de los recursos naturales disponibles, empleados para satisfacer los requerimientos de las comunidades. Es así como el gobierno de Colombia, al igual que muchos otros de la región, ha creado leyes y normas que reglamentan sobre la disposición de las aguas residuales, y han creado instrumentos económicos que estimulan la creación de la infraestructura necesaria para el mejoramiento de las condiciones de salud y saneamiento básico.

---

<sup>1</sup> Según estimación de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, la contaminación generada en la cuenca alta del río representa aproximadamente el 85% de la contaminación de la cuenca entera.

La ciudad de Tunja es la capital del departamento de Boyacá y municipio integrante del Corredor Industrial del departamento, el cual sustenta sus actividades económicas en la industria metalúrgica, minera, ganadera y agrícola, siendo esta última la actividad que más aporta al PIB del departamento, con una participación de aproximadamente el 30%, seguido por las actividades mineras con un 11% aproximado. Según el Departamento Nacional de Estadística de Colombia DANE, para el año 2005 la ciudad de Tunja contará con cerca de 117,600 habitantes en su cabecera municipal, dicha población ha sufrido a lo largo de su historia de prolongadas temporadas de sequía y escasez de agua.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, realizó para el año 2000 un estudio que reflejó el estado crítico de varias de las poblaciones del territorio nacional, encontrándose entre éstas la ciudad de Tunja, con una demanda anual de agua de 9.74 millones de metros cúbicos y una oferta de 17.8 millones en condiciones hidrológicas de años medio y de 4 millones para condiciones de año seco. Esta situación refleja una importante deficiencia en la regulación del recurso hídrico en el municipio, especialmente en las temporadas de sequía.

El presente documento se divide en cinco capítulos, en los que se presentan los antecedentes, políticas gubernamentales sobre el desarrollo sostenible y su relación con el desarrollo de proyectos de mejoramiento de la calidad del recurso hídrico en el país. Igualmente, se presenta un análisis de la situación hídrica de los municipios que conforman el Corredor Industrial, en el departamento de Boyacá, con base en el cual se desarrolla un caso de estudio consistente en el dimensionamiento, estimación de costos y evaluación económica de un sistema de tratamiento de aguas residuales municipales para la ciudad de Tunja, capital del departamento.

## **OBJETIVO GENERAL**

Elaborar un estudio que permita justificar, planear en el marco del desarrollo sostenible, así como dimensionar una planta de tratamiento de aguas residuales, tomando como caso de estudio la ciudad de Tunja, Colombia.

## **HIPÓTESIS**

El desarrollo de una metodología que permita formular un proyecto a partir del análisis conceptual de la situación en la que se encuentra enmarcado el proyecto, que contemple la selección de alternativas tecnológicas que resuelvan el problema planteado, el desarrollo de la ingeniería preliminar del proceso, la estimación de los costos de equipos, materiales, operación y mantenimiento de las instalaciones a construir, permitirá establecer las características principales de la tecnología más conveniente según las particularidades del proyecto, que contribuya a un acercamiento de las condiciones de desarrollo sostenible de la región, al igual que los impactos económicos en la población que soportará la inversión a través de la evaluación económica y financiera de la propuesta. Esta formulación y evaluación del proyecto determinará la viabilidad del proyecto bajo las condiciones financieras e institucionales establecidas y ofrecidas por el gobierno colombiano para el desarrollo de proyectos de inversión de tipo ambiental y social.

## **METAS**

- Recopilar la información reportada por instituciones ambientales de Colombia, que permitan establecer un diagnóstico del estado de la demanda y la oferta de agua fresca en el país y en los municipios del departamento de Boyacá.
- Definir el proceso de tratamiento del agua residual de la ciudad de Tunja, con base en los requerimientos de descontaminación, estipulados en las políticas definidas por la autoridad ambiental de la región e instituciones ambientales del país.
- Determinar las dimensiones del equipo principal de proceso, con base en la información obtenida de las características del agua residual de la ciudad, las características de población de la ciudad de Tunja y el proceso seleccionado de tratamiento.
- Realizar la estimación de costos del proyecto, siguiendo los métodos tradicionales existentes en la bibliografía para tal fin.
- Evaluar la viabilidad económica del proyecto, tomando en cuenta los costos y beneficios estimados que se generan de la operación de la planta de tratamiento de las aguas residuales para la ciudad de Tunja.

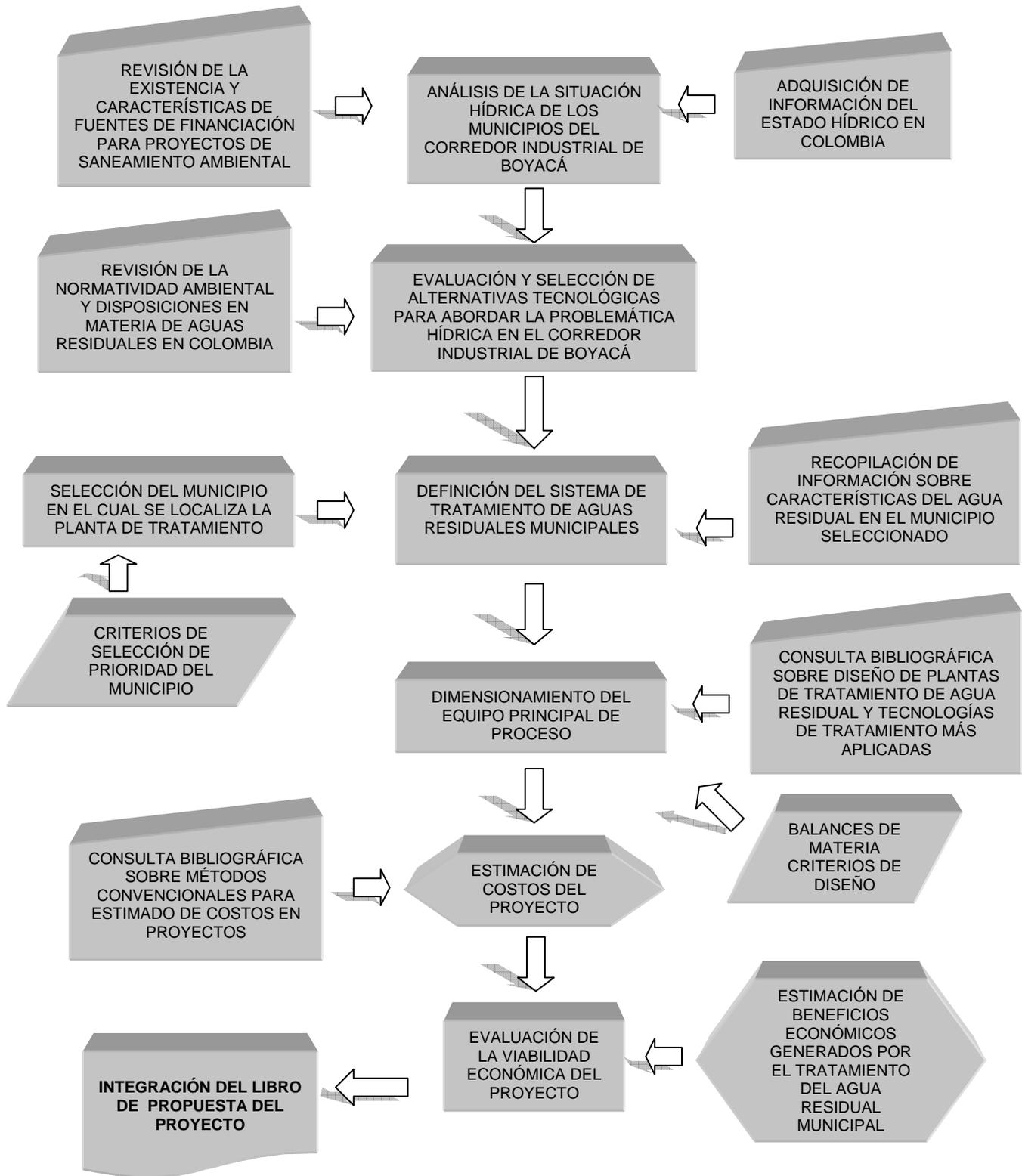
## **METODOLOGÍA**

La metodología que se siguió en el desarrollo del presente trabajo consistió en la recopilación inicial de información, que permitiera reflejar el estado y los requerimientos hídricos generales en Colombia; disposiciones y requerimientos en materia de aguas residuales formulados por el gobierno e instituciones ambientales del país como el Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Desarrollo y la Corporación Autónoma Regional de Boyacá; datos estadísticos sobre población y tasas de crecimiento en el Departamento Nacional de Estadística, y la información necesaria para fundamentar el proyecto en congruencia con los principios del concepto de desarrollo sostenible.

Posteriormente, con la información obtenida se analizó la situación actual, las proyecciones hechas de oferta y demanda de agua fresca para los diferentes municipios del país y la distribución de municipios según su relación demanda-oferta, mediante el cual se estableció el estado de vulnerabilidad en el que se encuentran gran parte de los municipios del departamento de Boyacá. Este resultado sirvió como base para proponer diferentes opciones viables de solución para la problemática hídrica y ambiental de la región, en especial de la capital, ya que presenta los mayores índices de escasez y las mayores concentraciones de carga orgánica en el río Chicamocha.

Partiendo de la opción óptima seleccionada, se realizó una evaluación técnica la cual incluyó la definición del tren de tratamiento del agua residual para el municipio, el dimensionamiento del equipo principal del proceso; igualmente, se desarrolló una evaluación económica a través de la realización de un estimado de costos, empleando datos para una planta de tratamiento similar y los métodos convencionales reportados en la bibliografía consultada.

Se realizó una estimación de los beneficios obtenidos de la ejecución del proyecto, principalmente identificados por el aporte económico que representa el ahorro en el pago de tasas por vertimientos de agua contaminada, y la venta del agua tratada para uso posterior en las actividades diferentes al consumo humano. Con los resultados obtenidos de la estimación de costos y de beneficios del proyecto, se realizó la evaluación financiera del proyecto, empleando el método convencional del cálculo de la tasa interna de retorno. En la ilustración 1 se presenta en forma de diagrama de flujo, la secuencia metodológica que se siguió para el desarrollo del presente trabajo.



**Ilustración 1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo empleada**

# **CAPITULO 1. ANTECEDENTES GENERALES DEL ESTADO DEL AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO**

## **1.1 EL AGUA POTABLE Y EL SANEAMIENTO BÁSICO EN AMÉRICA LATINA**

El agua es un recurso vital para el desarrollo humano, situación que se hace más crítica en los países en vía de desarrollo, en los cuales se estima que alrededor de 10,000 personas mueren diariamente a causa de enfermedades relacionadas con problemas en los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento básico[42]. Estas muertes y enfermedades son completamente evitables, en la medida en que se cuente con un acceso constante a sistemas seguros de abastecimiento de agua y sistemas de saneamiento básico. Prueba de esto es el aumento en la expectativa de vida en Europa después de la revolución sanitaria durante los siglos XVII y XVIII [42].

La falta de acceso a los sistemas de agua y saneamiento afecta el desarrollo de una comunidad. Esta carencia genera en la población un nivel de salud deficiente, problemas de desnutrición en los infantes, reduciendo así las esperanzas de vida; además, representa una limitación para el desarrollo industrial y socioeconómico no sólo de los países más deprimidos económicamente, sino que también son afectados los países que se encuentran en vías de desarrollo. Según información publicada por el UNEP<sup>2</sup> de las Naciones Unidas, en esta situación se encuentra cerca de un tercio de la población mundial, en donde el consumo es mayor al 10% de la disponibilidad de agua dulce.

El anterior panorama ha hecho que muchos gobiernos adopten el desarrollo de proyectos de agua potable y saneamiento básico, como herramienta importante en la lucha contra la pobreza y fortalecimiento del desarrollo sostenible de la comunidad mundial. Además, la región de América Latina despierta un inmenso interés en la preservación y protección del medio ambiente, debido a que posee el 40% de las especies tropicales de plantas y animales del mundo, y un tercio de las especies cultivadas de alimentos y productos industriales[36].

---

<sup>2</sup> United Nations Environment Programme UNEP. Global Environment Outlook 2000.

En zonas altamente ricas en recursos hídricos como lo es la región latinoamericana (alrededor del 30%[47] del agua superficial continental del mundo, distribuida entre los principales ríos suramericanos), la oferta hídrica regional se ve afectada por aspectos locales de distribución, variaciones estacionales y actividades humanas. Es así como tres regiones hidrográficas que comprenden un cuarto de toda la región y tienen casi la mitad de toda la población, solo cuentan con una disponibilidad del 10%[47] de las fuentes de agua. Según el Banco Mundial, menos del 5% de las aguas de alcantarillado reciben tratamiento[36], por lo que las aguas negras son vertidas a los cuerpos naturales de agua, creando un riesgo obvio para la salud humana, animal y ambiental

Para América Latina no es favorable la distribución de territorio árido, como lo señalan las Naciones Unidas y el ISIRIC<sup>3</sup> con su mapa mundial de la degradación de la tierra debida a acciones humanas. En su sección de Tierras y Alimentos[33], se reporta que dos terceras partes del territorio regional son clasificadas como áridas o semiáridas, incluyendo grandes regiones de México (centro y norte), Brasil (nordeste), Argentina, Chile y Perú[44]. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM reporta que estas variaciones de disponibilidad de agua se presentan incluso en países del trópico húmedo como los centroamericanos y Colombia[24], en donde la precipitación media oscila entre 400 y 7,500 milímetros al año.

La situación anterior se explica desde las características geográficas, en donde los océanos Pacífico como Atlántico tienen fuerte influencia, lo estrecho del territorio y las diferencias de altitud. En Colombia, por otro lado, la oferta hídrica total se estima superior a los 2,000 kilómetros cúbicos al año, es decir, un promedio nacional de 1.76 millones de metros cúbicos por kilómetro cuadrado. Al descontar las reducciones debidas a alteración de calidad y regulación natural, la oferta hídrica correspondería a unos 34,000 metros cúbicos por habitante al año. Lo anterior la ubica en el promedio regional, que es casi cinco veces mayor al promedio mundial (en Norteamérica es de 16,300 metros cúbicos, en Europa de 4,700, en África de 6,500 y en Asia de 3,400). Sin embargo, en años secos la disponibilidad promedio del recurso puede reducirse a 26,700 metros cúbicos por habitante[2,4] y en 9 de 32 departamentos (Boyacá, César, La Guajira, Magdalena, Norte de Santander, Risaralda, San Andrés, Sucre y Valle del Cauca), la oferta promedio de agua está por debajo de los 60.000 metros cúbicos por

---

<sup>3</sup> International Soil Reference and Information Center, ISIRIC.

kilómetro cuadrado (el 29% del promedio nacional). Además, los problemas regionales de disponibilidad de agua están aumentando, particularmente en países con una proporción importante de territorios áridos.

Fenómenos como la expansión demográfica, el aumento en las actividades industriales y el crecimiento del turismo (que puede llegar a consumir de cinco a diez veces más que otros sectores residenciales[40]), hacen que la demanda de agua crezca rápidamente. Es el caso de México<sup>4</sup>, que pasó de consumir en 1995 cerca del 10% de su agua dulce disponible a más de un 15%, al igual que Perú[43] a finales de los noventa. En países en los cuales el sector agrícola juega un papel relevante en la economía nacional, la irrigación puede alcanzar hasta un 60% del total del agua extraída, como es el caso de Brasil, en donde el crecimiento de las áreas irrigadas entre 1950 y 1998 fue del orden de casi un 4,500%[1]. En muchos casos, la diversificación de cultivos implica mayor irrigación, aumentando la presión sobre las fuentes hídricas disponibles. Además, se ha asociado el aumento de las tasas de deforestación con una posible contribución a los severos ciclos anuales de inundación y sequía. Esta deforestación trae como consecuencia erosión en la tierra, lo que produce sedimentos, que conjuntamente con los desechos domésticos e industriales se convierten en causas de deterioro de la calidad del agua.

La descarga directa de desechos domésticos e industriales no procesados en los cuerpos de agua superficial constituye la causa principal de la contaminación del agua. Esta práctica no solo afecta a los acuíferos superficiales, sino que a su vez, contamina los acuíferos de agua subterránea adyacentes. Con la expansión industrial se ha diversificado la presencia de los contaminantes del agua, incluyendo metales pesados, químicos tóxicos, sólidos orgánicos, entre otros. La práctica de tratar las descargas industriales es poco frecuente en el Caribe, como lo muestra una encuesta de la UNEP[45] en donde sólo el 39% de 140 pequeñas industrias encuestadas en 1995 realizaba algún tipo de tratamiento al agua residual.

La calidad de los cuerpos de agua cercanos a las grandes metrópolis se ve afectada negativamente por factores adicionales. Dentro de estos factores se encuentran el crecimiento en la construcción de alcantarillados convencionales, que no poseen las facilidades para el tratamiento de las aguas (mezcla de vertimientos de diferente

---

<sup>4</sup> Único país del continente americano que en 1995 presentaba un consumo superior al 10% de reservas de agua dulce.

naturaleza), la intensificación del uso agrícola de la tierra periférica a las grandes urbes, al igual que de agroquímicos tóxicos, la tendencia manufacturera de la industria, la concentración de escurrimientos provenientes de áreas pavimentadas de ciudades en desarrollo.

La minería artesanal se convierte en un sector que aporta altas cantidades de contaminantes a los cuerpos de agua, principalmente de mercurio proveniente de la explotación del oro. Esta actividad se presenta en prácticamente todos los países de América Latina[50], en donde se estima que se emite tanto mercurio como oro se produce. El alto costo del mercurio hizo que se adoptara el reciclaje del mercurio en el proceso de extracción del oro. Esta medida redujo los niveles de contaminante en los cuerpos de agua, que ya eran bastante altos a finales de los años 80.

Otro factor que afecta la calidad de los cuerpos de agua, en este caso subterránea, es la lixiviación por uso y disposición inadecuados de metales pesados, desechos peligrosos y químicos tóxicos. Los basureros son fuente importante de lixiviación de tóxicos. En América Latina parece estarse duplicando la cantidad de contaminantes en agua subterránea cada quince años[46]. En países insulares del Caribe, la intrusión de agua salada se convierte en fuente de contaminación.

El crecimiento demográfico y el aumento de la demanda industrial y agrícola de agua, generan un aumento en los costos de suministro, como en el Valle de México, en México, y costos de tratamiento del agua, como es el caso de Lima, en Perú, en donde la contaminación de las cuencas superiores ha significado un aumento del 30% en los costos de tratamiento[41]. Se espera para América Latina un crecimiento triplicado de la población y quintuplicado de la demanda de agua doméstica para las próximas cuatro décadas[54], lo que es un indicador claro de la urgente necesidad de dirigir los esfuerzos de desarrollo social a la realización de proyectos de tratamiento de aguas residuales.

Por otro lado, el uso de agua contaminada para beber y bañarse propaga enfermedades infecciosas como el cólera, la tifoidea y la gastroenteritis. Varios países han tenido estallidos recientes de estas enfermedades, que han afectado en particular a los sectores urbanos más pobres[33].

En la región Andina se encuentran países con situaciones de abastecimiento de agua potable y saneamiento básico críticos. Los principales exponentes de esta situación son Ecuador, Perú y Bolivia, países en los que organizaciones como el Banco Mundial y su Programa PAS<sup>5</sup> se han concentrado. Las cifras son preocupantes, ya que sólo una cuarta parte de la población rural de Bolivia y Perú y menos de la mitad de la de Ecuador tienen acceso a agua segura, mientras que menos de 35% tiene acceso al saneamiento en los tres países[42].

En toda la región, el PAS está ampliando su asociación con Organizaciones No Gubernamentales (ONG's) nacionales e internacionales, como el consorcio internacional CARE, con proyectos establecidos por otros donantes bilaterales, como la empresa GTZ<sup>6</sup>, perteneciente al gobierno alemán. El Programa también colabora con los Países Bajos en incrementar su impacto en la región [42].

## **1.2 ESTADO DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO EN COLOMBIA**

Si bien en la década anterior (1990-2000) se realizaron grandes esfuerzos por garantizar a la población la disponibilidad de agua potable en condiciones requeridas para una vida sana y digna, no han sido suficientes, ya que en la actualidad una de cada tres personas carece de este recurso vital en cantidad y calidad[4].

Los costos económicos asociados con brotes de enfermedades suelen ser altos, en lo que se refiere a atención curativa y preventiva de la salud pública en países en vía de desarrollo, costos que no incluyen las repercusiones sobre el sector de turismo y de comercio. Este gasto podría reducirse sensiblemente con la implantación de planes de saneamiento básico, si se tiene en cuenta que cerca de un 80%[4] de las enfermedades en países de desarrollo están asociadas al consumo de agua contaminada.

### **1.2.1 Aspectos demográficos relacionados con el agua potable y saneamiento básico**

Colombia se distribuye políticamente en 32 departamentos, con 1,091 municipios divididos entre cabecera municipal y zona rural. El último censo realizado por el

---

<sup>5</sup> Banco Mundial, Programa de Agua Potable y Saneamiento Básico.

<sup>6</sup> La Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit

Departamento Nacional de Estadística de Colombia DANE en 1993 muestra una población de 37,664,711 habitantes, distribuidos en un 68.6% en las cabeceras municipales y un 31.4% en las áreas rurales. En la Tabla 1 se puede observar un aumento en la población concentrada en las zonas urbanas en los últimos tiempos, tendencia que obedece principalmente a los fenómenos de expulsión[4] de la población de las zonas rurales del país.

En proyecciones realizadas por el Departamento Nacional de Estadística para el año 2002 se observaba una distribución de la población urbana del 70.4%, conservando la tendencia al aumento en las urbes del país. Este comportamiento sostenido aumenta la presión sobre las fuentes hídricas cercanas a las cabeceras municipales y grandes ciudades, llevándolas con el paso de los años a una situación cada vez más crítica de demanda y oferta de agua.

El censo de 1993 reportó un total de 4,467,000 viviendas en el área urbana y 1,739,000 en la rural, de las cuales el 94.6% y el 41.3% respectivamente alcanzaban una cobertura nominal<sup>7</sup> de acueducto. Con relación al servicio de alcantarillado, se alcanzaban coberturas aproximadas del 81.8 % en el casco urbano y 14.6%<sup>8</sup> en el rural. Para 1998, la cobertura promedio nacional nominal del servicio de acueducto fue del 89,2%, siendo los municipios menores de 2,500 habitantes los de mayor cobertura (93,6%). Los municipios capitales con poblaciones menores a 100,000 habitantes, fueron los que presentaron los más bajos índices de cobertura, situación que se repite para el servicio de alcantarillado[4]. En general, alrededor de 3 millones de colombianos no tenían servicio de acueducto con conexión domiciliaria en 1998, y casi 6.5 millones de habitantes de zonas urbanas no poseían acceso a sistemas de alcantarillado.

En la Tabla 2 se puede observar que la diferencia de coberturas del promedio nacional para acueducto y alcantarillado es del 10.6 %. Si esta diferencia se analiza por rango de población, se observa que la diferencia en algunos rangos municipales es superior al 20%[4].

---

<sup>7</sup>No se tiene en cuenta indicadores de calidad y continuidad del servicio, como tampoco el estado real de las redes de distribución

<sup>8</sup>No se incluyen soluciones individuales letrinas, pozos sépticos

**Tabla 1. Distribución de la población urbana y rural en Colombia**

AÑO CENSO	POBLACIÓN TOTAL	POBLACIÓN CABECERA	POBLACIÓN RESTO	% URBANO	% RURAL
1973	22,886,290	13,656,249	9,230,041	60.0%	40.0%
1985	30,062,207	19,627,615	10,434,592	65.0%	35.0%
1993	37,664,711	25,849,387	11,815,324	68.6%	31.4%
1998 <sup>a</sup>	40,768,721	28,719,052	12,049,669	70.4%	29.6%
1999 <sup>a</sup>	41,534,639	29,382,265	12,152,374	70.7%	29.3%
2002 <sup>a</sup>	43,771,178	31,345,401	12,425,777	71.6%	28.4%

FUENTE: *Censo Nacional 1993 DANE Colombia.*

<sup>a</sup> La población de estos años son proyecciones del DANE tomando como base el último censo nacional del año 1993.

**Tabla 2. Coberturas urbanas de acueducto y alcantarillado por rangos municipales**

Distribución por población	Rango municipal	N° municipios	Población urbana DANE 1998	Población rural DANE 1998	Cobertura urbana acued. 1998	Cobertura urbana alcant. 1998	Población urbana servida acude. 1998	Población urbana servida alcant. 1998
Áreas Metropolitanas	Centro	9	13,235,061	278,064	92.2%	87.3%	12,202,726	11,554,208
	Periferia	37	2,576,712	314,297	88.9%	80.0%	2,290,697	2,061,370
Sub-total		46	15,811,773	592,361	91.7%	86.1%	14,493,423	13,615,578
0-2,500	Rango 1	403	514,116	2,512,653	93.6%	80.2%	481,213	412,321
2,501-12,000	Rango 2	463	2,740,486	5,382,079	88.9%	66.0%	2,436,292	1,808,721
12,001-30,000	Rango 3	94	1,823,136	1,460,070	88.7%	64.0%	1,617,122	1,166,807
30,001-70,000	Rango 4	46	2,059,164	1,053,896	89.0%	64.5%	1,832,656	1,328,161
>70,000	Rango 5	16	1,857,360	429,573	87.2%	73.1%	1,619,618	1,357,730
Capitales <100,000	Rango 6	11	386,074	205,290	63.8%	62.0%	246,315	239,366
Capitales >100,000	Rango 7	12	3,526,943	413,747	84.3%	74.5%	2,973,213	2,627,573
Sub-Total		1,045	12,907,279	11,457,308	86.2%	69.2%	11,126,074	8,931,837
Total		1,091	28,719,052	12,049,669	89.2%	78.6%	25,619,498	22,547,415

FUENTE: *Ministerio de Desarrollo de Colombia, 1998.*

En cuanto a las zonas rurales del país, el Departamento Nacional de Estadística calculaba para 1998 que la población con acceso a conexiones domiciliarias de acueducto alcanzaba los 5 millones de habitantes, que representaba un 41.7 % del sector rural total, de los cuales solo el 10% disponía de agua de buena calidad<sup>9</sup>. Alrededor de 2 millones de pobladores, cerca del 16.6%, disponían de aguas servidas en condiciones sanitarias aceptables.

<sup>9</sup> Ministerio de Salud. El agua, un recurso invaluable

Adicionalmente, el servicio de suministro de agua se prestaba en promedio seis o menos horas al día. Estos porcentajes de cobertura no incluyen soluciones individuales de abastecimiento y disposición de aguas residuales que son comunes en estas zonas rurales[4].

### **1.2.2 Disposición y cobertura de tratamiento de los residuos líquidos en el país**

En Colombia, la concentración de coliformes en cuerpos de agua superficiales alcanza los 2,400 NMP<sup>10</sup>/100 mL, según lo determinó la Organización Panamericana de la Salud[32] de acuerdo con muestreos realizados en las principales ciudades del país. Los sectores responsables de la contaminación hídrica en Colombia son el sector doméstico, con un aporte aproximado de 1,500 toneladas diarias de materia orgánica contaminante, el sector industrial, con 500 y finalmente el agropecuario, con un aporte de 7,200 toneladas diarias de materia orgánica, que descargan alrededor de 4 millones y medio[4] de metros cúbicos de aguas residuales. Según estimaciones del Ministerio de Desarrollo[37], si todas las cabeceras municipales contaran con plantas de tratamiento, la carga orgánica sólo se reduciría en un 25%.

El mayor problema que se genera con esta dinámica, es la contaminación de acuíferos que sirven como fuente de abastecimiento de agua potable, de irrigación o recreación, por agentes tóxicos y patógenos descargados directa o indirectamente. Ante esta situación se decidió implementar el cobro de *tasas retributivas por el vertimiento puntual*<sup>11</sup>, con lo que se buscaba estimular el inicio de una cultura de tratamiento de aguas residuales.

Según el Ministerio del Medio Ambiente[28], en 1998 en Colombia el número de plantas de tratamiento de aguas residuales construidas alcanzaba las 190 unidades, ubicadas en el 12% de las cabeceras urbanas, correspondiente a 131 localidades. La distribución tecnológica de estas plantas se muestra en la Tabla 3.

---

<sup>10</sup> Número Más Probable

<sup>11</sup> Decreto 609 de 1997, Colombia

**Tabla 3. Distribución de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en Colombia**

<b>TECNOLOGÍA DEL PROCESO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PORCENTAJE %</b>
Lagunas (aerobias/ anaerobias)	105	55.0
Lodos activados (aerobios)	43	22.5
Filtros percoladores (aerobios)	24	13.0
Sistemas UASB (anaerobios)	17	9.0
Sistema operativo primario	1	0.5
<b>TOTAL</b>	<b>190</b>	<b>100</b>

FUENTE: *Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 1998.*

En la tabla anterior se puede observar que la tecnología preferida eran en dicho año las lagunas de estabilización, en menor escala lodos activados, filtros percoladores y sistemas UASB<sup>12</sup>. En pequeños centros urbanos<sup>13</sup> y en la zona rural, es muy frecuente el empleo de tecnologías mucho más sencillas como los pozos sépticos[4].

Para finales del 2001 se contaba con una infraestructura disponible suficiente para tratar un 20% de las aguas residuales urbanas[11], aunque a pesar de esta cobertura, sólo se lograba un cubrimiento efectivo cercano al 4%[4], ya que gran parte de las plantas existentes trabajaban por debajo de su capacidad de diseño y en condiciones no óptimas de operación.

---

<sup>12</sup> Siglas que en inglés significan Upflow Anaerobic Sludge Blanket

<sup>13</sup> Poblaciones inferiores a 300 habitantes.

## **CAPÍTULO 2. DESARROLLO SOSTENIBLE Y POLÍTICA AMBIENTAL DE DESCONTAMINACIÓN HÍDRICA EN COLOMBIA**

### **2.1 RELACIÓN ENTRE DESARROLLO SOSTENIBLE Y DESCONTAMINACIÓN HÍDRICA**

La filosofía del desarrollo sostenible de basa en el hecho de que las comunidades, las economías de éstas y el ambiente se encuentran íntimamente relacionados. Existe una interdependencia entre la manera en que una comunidad administra el ambiente, en la forma en que ésta se organiza y el desarrollo económico que presenta.

Es así como la descontaminación del recurso hídrico, a través del desarrollo y expansión de la infraestructura destinada al tratamiento de aguas residuales, promueve no sólo la protección del medio ambiente, sino que a su vez estimula la generación de riqueza en la sociedad, en la medida en que el aumento en la disponibilidad de agua fresca estimula el desarrollo económico en la región. Este desarrollo se ve reflejado en el aumento y generación de actividades económicas que se encuentran limitadas ante la escasez del recurso hídrico. Una vez se hagan realidad y se ejecuten los planes de recuperación del recurso hídrico en el país, se conseguirá un aporte sensible al proceso continuo de mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad.

Es claro que la descontaminación de las cuencas hídricas debe ser tomada como un componente estratégico dentro de un plan integral, orientado a propiciar las condiciones óptimas para un desarrollo sostenible en el país. Como su nombre lo indica, este plan integral ha de contemplar políticas encaminadas a la generación y desarrollo de alternativas tanto preventivas como curativas. Es el caso del desarrollo de programas de protección y recuperación de zonas deforestadas y de los cuerpos naturales de agua, programas de reutilización del agua, el desarrollo de programas de toma de conciencia del uso racional y eficiente del agua en la población, la creación de mecanismos financieros que soporten el desarrollo de los proyectos de descontaminación hídrica, entre otras iniciativas.

Es importante tener en cuenta que el desarrollo sostenible no hace referencia a una meta tangible y cuantificable, que se pueda alcanzar en un mediano plazo o momento

específico. Es probablemente la conjunción de un gran número de consecuencias, que confluyen en un estado dinámico de equilibrio y en el cual es posible satisfacer las necesidades del momento, sin comprometer la disponibilidad de los recursos que servirán posteriormente a las generaciones venideras en la satisfacción de sus propios requerimientos.

Por lo tanto, es de vital importancia enfocar los esfuerzos necesarios al estímulo y generación de los efectos, que en un futuro se traducirán en las consecuencias que nos han de permitir coexistir en un ambiente sostenible. Uno de estos efectos es el manejo racional, eficiente e integral del agua, propiciado a través de la descontaminación hídrica.

## **2.2 SOSTENIBILIDAD EN LA POLÍTICA GENERAL DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO**

La política definida por la Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico y Ambiental del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia, se fundamenta en *“Garantizar la disponibilidad de agua potable y saneamiento básico y ambiental para mejorar la calidad de vida de la población e incentivar el desarrollo económico, bajo principios de equidad, sostenibilidad ambiental y eficiencia”*[12].

Se puede apreciar que con la formulación de una directriz institucional como la que formula el gobierno colombiano, se busca enfocar los esfuerzos futuros a la consecución de las condiciones que permitan alcanzar un entorno sostenible en el país. El incremento en la calidad de vida de la comunidad, el estímulo al desarrollo económico de la misma, el respeto, el cuidado y el uso eficiente de los recursos naturales, conseguidos a través del aumento en la disponibilidad de agua fresca proveniente de la descontaminación del recurso hídrico, representa una alternativa dentro del vasto esfuerzo internacional para alcanzar el desarrollo sostenible del planeta, y que se formalizó durante el desarrollo de la Conferencia Mundial de Río de Janeiro en 1992, en la que más de 100 naciones firmaron la Agenda 21.

**Tabla 4. Dimensiones de sustentabilidad en la política de agua potable y saneamiento básico de Colombia**

DIMENSIÓN DE LA POLÍTICA	ENFOQUE SOSTENIBLE
INSTITUCIONAL	Se orienta a la modernización y fortalecimiento de los prestadores de los servicios públicos de agua potable, alcantarillado y residuos sólidos, a partir de economías de escala y desarrollo de proyectos de interés regional.
AMBIENTAL	Se orienta al manejo integral y sostenible del recurso hídrico dando prioridad a las necesidades para el consumo humano, al adecuado manejo de residuos sólidos y líquidos y al ordenamiento de cuencas abastecedoras.
TECNOLÓGICA	Se orienta al fomento de tecnologías que generen calidad, cobertura y continuidad en la prestación de los servicios, a la creación de instancias y mecanismos para el intercambio de conocimientos y procesos tecnológicos exitosos aplicables y replicables en el sector.
FINANCIERA	Se orienta a la optimización y al manejo integral de los recursos disponibles para la ejecución de proyectos del sector en los distintos niveles territoriales, institucionales y empresariales.
SOCIAL	Se orienta a la generación de espacios de concertación y participación ciudadana, al fortalecimiento de procesos democratización de las empresas prestadoras y a la generación de empresas de servicios públicos comunitarias.

FUENTE: *Gestión Integral del Agua* [12].

En la tabla anterior se presenta la descripción de la política del Ministerio de Ambiente de Colombia, en lo que se refiere a manejo y gestión del agua. Esta estructuración se basa en la formulación de acciones contenidas en las dimensiones institucional, ambiental, tecnológica, financiera y social, de tal forma que constituyan un plan integral para el manejo del agua como un recurso generador de vida y desarrollo sostenible. Es importante destacar que dentro de la dimensión institucional de la política de agua potable y saneamiento básico, se encuentra el desarrollo de proyectos de interés regional. Un sistema de tratamiento de aguas residuales podría constituir un proyecto de inversión, que despierte el interés de los diferentes actores involucrados en el desarrollo social, ambiental y económico de una región específica.

### **2.3 ASPECTOS LEGALES, INSTITUCIONALES Y FINANCIEROS EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS AMBIENTALES**

En Colombia, el avance en materia de saneamiento hídrico (recolección, transporte y tratamiento de los residuos líquidos) presenta atrasos significativos, pues el tratamiento de aguas residuales no sobrepasa el 20% de la cantidad que se genera.

Sin embargo, a partir de la expedición del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto 2811 de 1974) el avance de la legislación ambiental ha sido notable. Medidas como la creación del Ministerio del Medio Ambiente (Ley 99 de 1993) con el Sistema Nacional Ambiental (SINA), la reestructuración de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) y las Unidades Ambientales Urbanas, perfeccionan y fortalecen el concepto constitucional de autoridad ambiental y le confiere operatividad mediante actos legislativos de carácter reglamentario (Decreto 1753/94)[29].

Como lo marca la Ley 99 del 22 de diciembre de 1993, el Sistema Nacional Ambiental es el conjunto de lineamientos, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permiten la puesta en marcha de los principios generales ambientales, y nace como resultado del proceso de construcción de esquemas institucionales y sociales, que estuvieran acordes con la responsabilidad de proteger y hacer un uso sostenible del patrimonio ambiental colombiano, considerado entre los cinco más ricos del planeta. La estructura del SINA se presenta en el Anexo 1.

La Ley 142 de 1994 se constituye en el Régimen de los Servicios Públicos Domiciliarios, entre estos los alcantarillados y plantas de tratamiento. En dicha ley se define el tratamiento de aguas residuales como una actividad complementaria del servicio público domiciliario de alcantarillado, y desde el punto de vista ambiental en la Ley 99/93[14]. En noviembre del año 2000 el Ministerio de Desarrollo Económico expide el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS (Resolución 1096).

Desde el punto de vista institucional, se ha establecido como uno de los objetivos de política, *contribuir con la sostenibilidad de los sectores productivos mediante la ejecución de programas prioritarios como Agua, Producción Más Limpia y Calidad de Vida Urbana*. Esta iniciativa hace parte del proyecto Colectivo Ambiental del Plan Nacional de Desarrollo “Cambio para construir la Paz” del gobierno colombiano.

Con dicha intención se suscribieron diferentes agendas de trabajo entre Ministerios, siendo una de ellas la acordada con el Ministerio de Desarrollo Económico, en la que se reconoce *la necesidad de ejecutar un trabajo conjunto, coordinado y concertado, para el desarrollo sostenible del sector y para la realización de acciones orientadas a la*

*protección y recuperación ambiental del país*, primordialmente en temas relacionados con aguas residuales y residuos sólidos[29].

Es así como se ha venido trabajando en el desarrollo de compromisos ambientales y planes de acción, en los que se encuentran involucrados de manera activa los Ministerios del Medio Ambiente y Desarrollo Económico, y se cuenta con la participación de varias Corporaciones Autónomas Regionales.

**Tabla 5. Instrumentos de financiación de proyectos de tratamiento de aguas residuales en Colombia**

FUENTE DE LOS RECURSOS	INSTRUMENTO DE FINANCIAMIENTO	DESCRIPCIÓN DEL RECURSO DE FINANCIAMIENTO
<b>TARIFAS DE ALCANTARILLADO</b> Ley 142 de 1994		Se estipula que la tarifa de alcantarillado debe cubrir los costos de prestación del servicio. El depender sólo de recursos de tarifa, tiene implicaciones económicas por el desmonte de subsidios, la inclusión de las tasas retributivas y los costos de inversión, operación y mantenimiento de la infraestructura de saneamiento.
<b>SECTOR AMBIENTAL</b> Ley 99 y sus decretos reglamentarios	Tasas retributivas	La sentencia C-495/96 destina los recursos financieros generados por la tasa, a solucionar el hecho que las determina; además, el artículo 90 de la ley 812 de 2003 – Plan Nacional de Desarrollo, estipula que “los recaudos de la tasa retributiva por vertimientos se destinarán exclusivamente a proyectos de inversión de descontaminación hídrica y monitoreo de la calidad de agua”
	Porcentaje ambiental de los gravámenes a la propiedad inmueble	Este es un gravamen indicado en el artículo 44 de la ley 99, al cual se tiene acceso a través de la transferencia de un porcentaje del recaudo del impuesto predial, que oscila entre un 15% y un 25.9% o una sobretasa entre el 1.5 y el 2.5 por mil sobre el avalúo de los bienes
	Transferencias del sector eléctrico	Este es un recurso establecido en el artículo 45 de la ley 99, proveniente de las empresas generadoras de energía hidroeléctrica, cuya potencia nominal instalada total supera los 10.000 kilovatios. Estas empresas transferirán el 6% de las ventas brutas de energía de la siguiente forma:  - El 3% para los municipios y distritos localizados en la cuenca hidrográfica, distribuidos así: El 1.5% para los municipios y distritos de la cuenca hidrográfica que surte el embalse. El 1.5% para los municipios y distritos donde se encuentra el embalse. Estos recursos sólo podrán ser utilizados por los municipios en obras previstas en el plan de desarrollo municipal, con prioridad para proyectos de saneamiento básico y mejoramiento ambiental.  - El 3% restante serán transferidos para la CAR que tenga jurisdicción en el área donde se encuentra localizada la cuenca hidrográfica y el embalse. Estos recursos serán destinados a la protección del medio ambiente y a la defensa de la cuenca hidrográfica y del área de influencia del proyecto.

FUENTE DE LOS RECURSOS	INSTRUMENTO DE FINANCIAMIENTO	DESCRIPCIÓN DEL RECURSO DE FINANCIAMIENTO
<b>RECURSOS FISCALES</b>	Transferencias de los ingresos corrientes de la nación. Artículo 78 de la ley 715 de 2001 "Sistema General de Participación"	En este artículo se determina que aproximadamente el 6% de los recursos que reciben los municipios por transferencias de los ingresos corrientes de la nación, se destinen para el sector agua potable y saneamiento básico, específicamente para la financiación de inversiones en infraestructura, así como a cubrir los subsidios que se otorguen a los estratos subsidiados de acuerdo con lo dispuesto en la ley 142 de 1994.
	Regalías	La destinación de los recursos del Fondo Nacional de Regalías se reglamenta en la ley 756 de 2002, que en su artículo 7 sólo incluye recursos para los programas de saneamiento hídrico de Bogotá y Cali.

FUENTE: *ECOS DE ECONOMÍA* No. 18, Colombia [14]

Para el diseño y ejecución de las diferentes alternativas ambientales en el país, el gobierno apoyado en las diferentes instancias políticas y ambientales, ha diseñado una estructura para el financiamiento de proyectos encaminados a la recuperación ambiental en Colombia. Dentro de las fuentes de financiamiento para la construcción y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, se encuentran los recursos provenientes de las tarifas de alcantarillado, los recursos ambientales y los recursos de origen fiscal de manera general.

En la Tabla 5 se describe con más detalle los instrumentos de financiación dispuestos por el gobierno, que permitirán acceder a los recursos necesarios para garantizar la financiación de los estudios, diseños, inversión en infraestructura de recolección, transporte y tratamiento, así como la operación y mantenimiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales.

# **CAPÍTULO 3. SITUACIÓN HÍDRICA DE LOS MUNICIPIOS DEL CORREDOR INDUSTRIAL DE BOYACÁ**

## **3.1 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN HÍDRICA**

El Balance Hídrico Nacional consiste en un balance de agua, en el que son equivalentes los aportes de agua que entran por un lado de una unidad hidrológica determinada y la cantidad de agua que se evacua por el otro. Este balance considera además las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante un periodo de tiempo determinado. Se considera el caudal mínimo de reserva como aquel necesario para la conservación de la flora, la fauna y el ecosistema existentes en la corriente o cuerpo de agua.

Un factor que restringe la disponibilidad y limita el número de posibles usos del agua es la calidad de la misma. Los ríos colombianos reciben y transportan cargas de agua vertidas en su mayoría sin tratamientos previos, provenientes de los sectores doméstico e industrial, del escurrimiento de zonas de producción agrícola y ganadera, extracción minera y agua lluvia que arrastra compuestos presentes en la atmósfera.

La conductividad del agua, expresada en el contenido de sales es otra variable que limita la disponibilidad del agua. La mayoría de los ríos colombianos presentan bajos contenidos de sales, lo que los hace aptos para las actividades de riego de una amplia variedad de cultivos. Sin embargo, la mayor parte del sistema hídrico nacional se encuentra en proceso de alteración[30], debido al transporte de sedimentos y de sustancias tóxicas. Esta tendencia es bien marcada en los corredores industriales, que se ubican sobre las principales<sup>14</sup> cuencas del país.

### **3.1.1 Cuantificación de la demanda hídrica y usos del agua**

Para la demanda de la población por habitante, las estimaciones se basaron en el uso de coeficientes estándares de demanda por habitante, tomando en cuenta los requerimientos de consumo básico por día, diferenciados por *cabecera* y *resto* para cada uno de los municipios.

---

<sup>14</sup> Bogotá-Soacha, Medellín-Itagüí, Cali-Yumbo, Sogamoso-Duitama-Nobsa, Barranquilla-Soledad y Cartagena-Mamonal.

Estos coeficientes de consumo básico diario de agua se miden en litros/habitante/día (L/hab/día); considera los usos que la población percibe como básicos como lavado de ropas, sanitario, ducha, lavado de platos, aseo de la vivienda, consumo propio y lavado de manos. Los rangos inferior y superior para estos coeficientes[30] son 141 L/hab/día y 161 L/hab/día respectivamente. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, estimó en su primer Estudio Nacional del Agua[23] que los promedios de consumo para zonas urbanas era de 170 L/hab/día, y para las zonas rurales de 120 L/hab/día. La Tabla 6 presenta un resumen para los diferentes tipos de demanda y usos del recurso hídrico para el año 2000.

**Tabla 6. Demanda de agua por diversos conceptos para el año 2000**

DEMANDA	NIVEL URBANO <sup>a</sup>		NIVEL MUNICIPAL <sup>b</sup>	
	Volumen (miles de m <sup>3</sup> )	Participación (%)	Volumen (miles de m <sup>3</sup> )	Participación (%)
Habitantes urbanos	1,867,650	91.46	1,867,650	34.10
Habitantes rurales			534,368	9.80
Pecuaría			524,125	9.60
Riego pequeña			354,248	6.50
Servicios	64,678	3.17	64,678	1.20
Industria urbana	109,558	5.37	109,558	2.00
Gran irrigación			1,757,771	32.20
Gran industria			249,176	4.6
Demanda total	2,041,886	100	5,461,574	100
Demanda para 2015	7,823,314			
Demanda para 2025	10,114,007			

FUENTE: *Estudio Nacional del Agua IDEAM* [30].

<sup>a</sup> Demanda urbana por población, servicios e industria urbana.

<sup>b</sup> Demanda por población urbana y rural, grandes consumidores industriales, servicios, pecuaría, pequeños y grandes distritos de riego.

Se estima que la demanda de agua para usos humanos e industriales conservará su tendencia creciente, pero además, agravando la situación, se espera una reducción en la oferta del recurso hídrico. Esta reducción en la oferta se sustenta en el aumento en la deforestación y en la ausencia casi total de tratamiento de aguas residuales.

### 3.1.2 Oferta hídrica para el abastecimiento municipal

Esta oferta hídrica proporciona en forma general el volumen medio disponible de agua en los municipios. Toma en cuenta los aportes de agua generados en el área del

municipio, el caudal aguas arriba de los ríos que pasan por esta área, las isolíneas de escorrentía y la superficie total de los municipios[30].

**Tabla 7. Índices de escasez y vulnerabilidad para los municipios del CIB. Condiciones hidrológicas de año medio y seco**

MUNICIPIO	Demanda anual MMC <sup>a</sup>	Oferta a media MMC	Oferta año seco MMC	Cap. de regular	Presión sobre calidad (DBO) miles ton/año	AÑO MEDIO			AÑO SECO		
						Oferta reducida	Rel. D/O (%)	Vul <sup>b</sup>	Oferta reducida	Rel. D/O (%)	Vul <sup>b</sup>
Tunja	9.74	35.3	8.12	Baja	39.31	17.79	54.79	A	4.09	238.2	A
Cómbita	0.7	54.26	12.48	Baja	1.82	27.34	2.59	M	6.29	11.26	A
Duitama	7.0	85.62	37.67	Baja	18.64	43.14	16.23	A	18.98	36.88	A
Nobsa	0.64	12.77	5.62	Baja	1.93	6.43	9.98	M	2.83	22.68	A
Paipa	2.20	138.88	61.11	Baja	3.98	6.98	3.15	M	30.79	7.16	M
Sogamoso	12.79	110.37	50.77	Baja	20.93	55.62	23.33	A	25.58	50.72	A
Sotaquirá	0.83	89.95	20.69	Baja	1.86	45.33	1.84	M	10.43	8.02	M
Tibasosa	4.65	28.99	12.76	Baja	1.5	14.61	31.88	A	6.43	72.45	A
Tuta	1.28	31.46	7.23	Baja	1.29	15.85	7.46	M	3.65	32.45	A

FUENTE: *Estudio Nacional del Agua IDEAM* [30]

<sup>a</sup> Millones de metros cúbicos.

<sup>b</sup> Vulnerabilidad por disponibilidad de agua: A (alta) y M (media).

En la Tabla 7 se presentan los estimativos del índice de escasez<sup>15</sup> y vulnerabilidad<sup>16</sup> para condiciones hidrológicas de año medio y de año seco, de acuerdo con la serie histórica para el Corredor Industrial de Boyacá<sup>17</sup> CIB, correspondiente a la cuenca alta del río Chicamocha. Esta oferta incluye la reducción para mantener el régimen hidrológico mínimo para el sostenimiento de los ecosistemas y por las limitaciones de uso a causa de alteraciones de la calidad.

### 3.1.3 Proyecciones de demanda y oferta para los años 2015 y 2025

La mayor parte del territorio colombiano y sus municipios poseen un adecuado abastecimiento de agua. Sólo una pequeña fracción de municipios presenta índices de escasez altos, aunque de continuar la tendencia de explosión demográfica, de sobreexplotación y contaminación de las fuentes hídricas, este número de municipios

<sup>15</sup> Relación porcentual entre la demanda de agua que ejerce en su conjunto las actividades sociales y económicas para su uso y aprovechamiento, con la oferta hídrica disponible.

<sup>16</sup> Se define como indicador cualitativo del grado de fragilidad del sistema hídrico para el abastecimiento y la amenaza de sequía cuando se presentan condiciones hidroclimáticas medias y extremas.

<sup>17</sup> Tunja, Cómbita, Duitama, Nobsa, Paipa, Sogamoso, Sotaquirá, Tibasosa, Tuta.

podría crecer sensiblemente en número. Las proyecciones 2015 y 2025 de demanda y oferta de agua para los municipios del Corredor Industrial de Boyacá se muestran en la Tabla 8. Una distribución de los índices de escasez en los municipios y cabeceras municipales de Colombia para los años 2015 y 2025 se presenta en la ilustración 2.

En esta tabla se puede observar que de continuar el manejo del recurso hídrico bajo la dinámica actual de presión de las fuentes hídricas y de ausencia de tratamiento de las aguas residuales, en menos de una década se estará viviendo una situación crítica de escasez de agua en las principales ciudades del departamento de Boyacá, como es el caso de la capital Tunja, con un índice de escasez cercano a 400% en el año 2015, seguido por Tibasosa y un índice casi de un 150%, y Sogamoso con un 101%. Esto quiere decir que, en el caso de Tunja, la demanda de agua será cuatro veces más grande que la oferta hídrica en condiciones de año seco para el año 2015. Las proyecciones para el año 2025 no son más alentadoras.

**Tabla 8. Proyecciones para los años 2015 y 2025 del índice de escasez de los municipios del CIB**

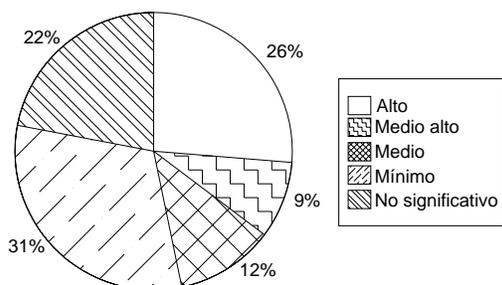
MUNICIPIO	PROYECCIÓN 2015	PROYECCIÓN 2025
	Índice de escasez (año seco) en %	Índice de escasez (año seco) en %
TUNJA	397.41	554.67
CÓMBITA	17.19	26.25
DUITAMA	65.43	96.01
NOBSA	31.17	44.02
PAIPA	12.79	19.95
SOGAMOSO	101.97	162.66
SOTAQUIRÁ	13.88	22.48
TIBASOSA	146.85	239.28
TUTA	59.19	93.91

FUENTE: *Estudio Nacional del Agua IDEAM* [30].

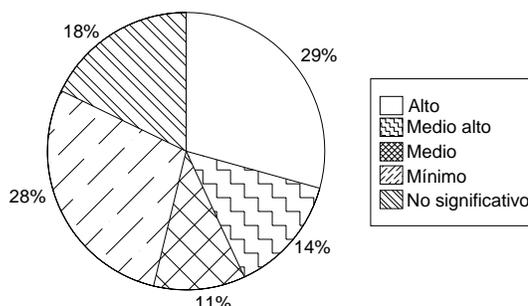
En las gráficas 1 y 2 de la ilustración 2 se pueden observar que se espera un aumento en el porcentaje de municipios con un índice de escasez medio-alto, entre los años 2015 y 2025, al pasar del 9% al 14%, mientras que los del índice alto de escasez, sólo subirían a partir de un 26% tres puntos porcentuales.

Esto muestra que entre los años 2015 y 2025, un gran número de municipios pasaría a estar en una situación hídrica muy frágil, aumentando la probabilidad de presentar

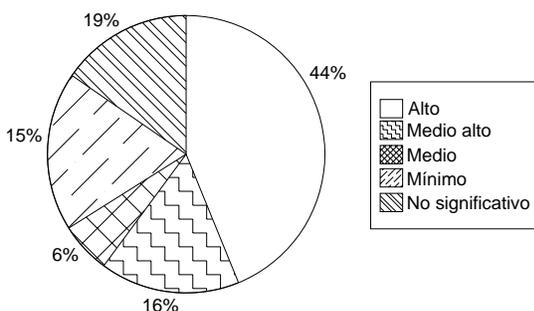
índices altos de escasez, situación que al desarrollarse desataría una crisis importante en cuanto a la oferta nacional de agua. Al nivel de las cabeceras municipales no se esperan cambios sensibles entre estos dos años, como se percibe en las gráficas 3 y 4.



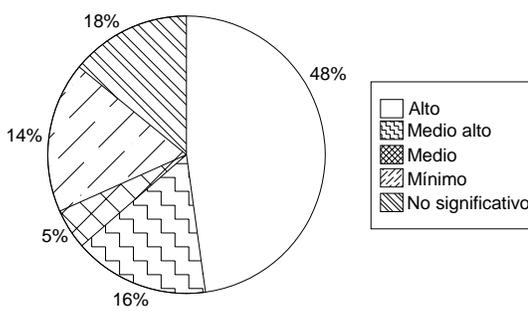
(1) Índice de escasez municipal en Colombia. Condición hidrológica de año medio. Proyección a 2015



(2) Índice de escasez municipal en Colombia. Condición hidrológica de año medio. Proyección a 2025



(3) Índice de escasez en cabeceras municipales colombianas. Condición hidrológica de año seco. Proyección a 2015



(4) Índice de escasez en cabeceras municipales colombianas. Condición hidrológica de año seco. Proyección a 2025

**Ilustración 2. Proyecciones del índice de escasez en Colombia. (Fuente: Ministerio del Medio Ambiente. IDEAM Colombia, Estudio Nacional del Agua IDEAM 2000, Bogotá).**

En las gráficas 1 y 2 de la ilustración 3 se muestran la distribución porcentual del índice de escasez municipal actual<sup>18</sup> para año de condiciones hidrológicas medias y secas respectivamente. Para los fines de este estudio, cabe resaltar que en la categoría de índices medios-altos, bajo condiciones de año medio, se encuentran 16 municipios, 3 de ellos en el departamento de Boyacá. En cuanto a los índices medios, los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Meta<sup>[30]</sup> son los de mayor significación.

<sup>18</sup> Para el año 2000, año del estudio realizado por el IDEAM.

En cuanto las condiciones hidrológicas se hacen más secas, el número de municipios clasificados dentro del índice de escasez alto se incrementa a 7 municipios[30], de los cuales, el mayor porcentaje se ubica en Boyacá. En la categoría de índice medio-alto aparecen 30 municipios, siendo nuevamente el departamento de Boyacá[30] el de mayor participación, con 9 poblaciones.

Igualmente ocurre con los 47 municipios que figuran en la categoría de índice de escasez medio, Boyacá en primer lugar. En las gráficas 3 y 4 se aprecia la distribución porcentual del índice de vulnerabilidad, como resultado de la interacción de los índices de escasez y regulación hídrica natural. La mayoría de los índices se encuentran ubicados en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Santander y Norte de Santander[30].

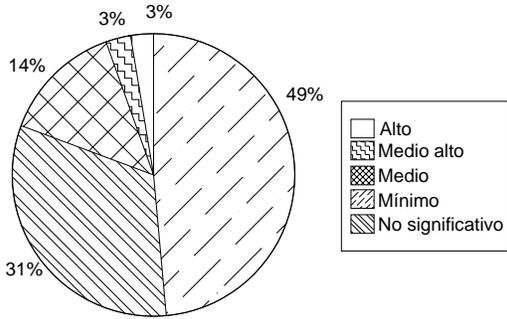
Según el estudio del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM<sup>19</sup>, en la categoría de media vulnerabilidad están involucrados 547 municipios, lo que implica alrededor de 16 millones de habitantes, volviendo a encontrarse Boyacá como un departamento de alta participación.

Analizando la situación del departamento de Boyacá, desde el punto de vista del índice de escasez como desde el índice de vulnerabilidad, se puede concluir que es una región con un alto riesgo de desabastecimiento de agua, especialmente en años de condiciones hidrológicas secas.

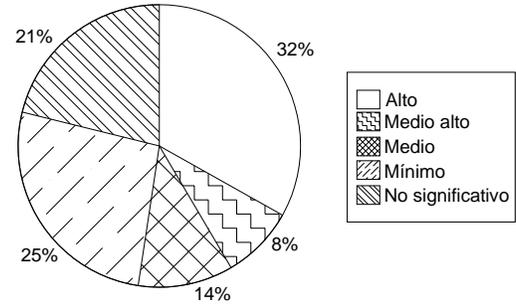
Este diagnóstico indica que debemos dirigir primordialmente nuestros esfuerzos hacia el desarrollo de planes estratégicos que impulsen y desarrollen proyectos de tratamiento de aguas residuales, y planes que lleven a un aprovechamiento eficiente y racional del recurso hídrico por parte de los diferentes sectores responsables de la contaminación de los cuerpos naturales de agua.

---

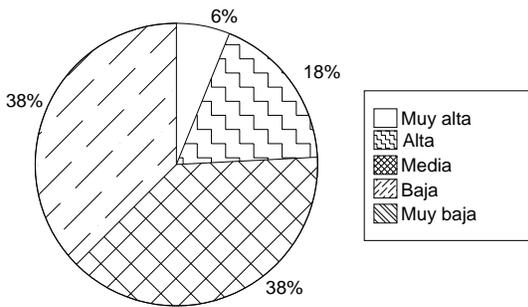
<sup>19</sup> Estudio Nacional del Agua 2000, IDEAM.



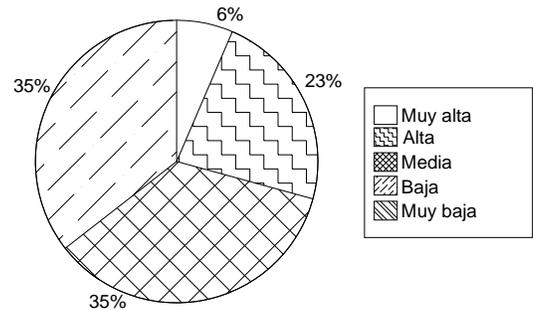
(1) Índice de escasez municipal en Colombia. Condiciones hidrológicas de año medio



(2) Índice de escasez municipal en Colombia. Condiciones hidrológicas de año seco



(3) Índice de vulnerabilidad por disponibilidad de agua en los municipios colombianos. Condiciones hidrológicas de año medio



(4) Índice de vulnerabilidad por disponibilidad de agua en los municipios colombianos. Condiciones hidrológicas de año seco

**Ilustración 3. Índices de escasez y vulnerabilidad en los municipios colombianos para el año 2000. (Fuente: Ministerio del Medio Ambiente. IDEAM Colombia, Estudio Nacional del Agua IDEAM 2000, Bogotá).**

Este diagnóstico indica que se deben dirigir primordialmente los esfuerzos hacia el desarrollo de planes estratégicos que impulsen y desarrollen proyectos de tratamiento de aguas residuales, y planes que lleven a un aprovechamiento eficiente y racional del recurso hídrico por parte de los diferentes sectores responsables de la contaminación de los cuerpos naturales de agua.

### 3.1.4 La problemática hídrica del departamento de Boyacá

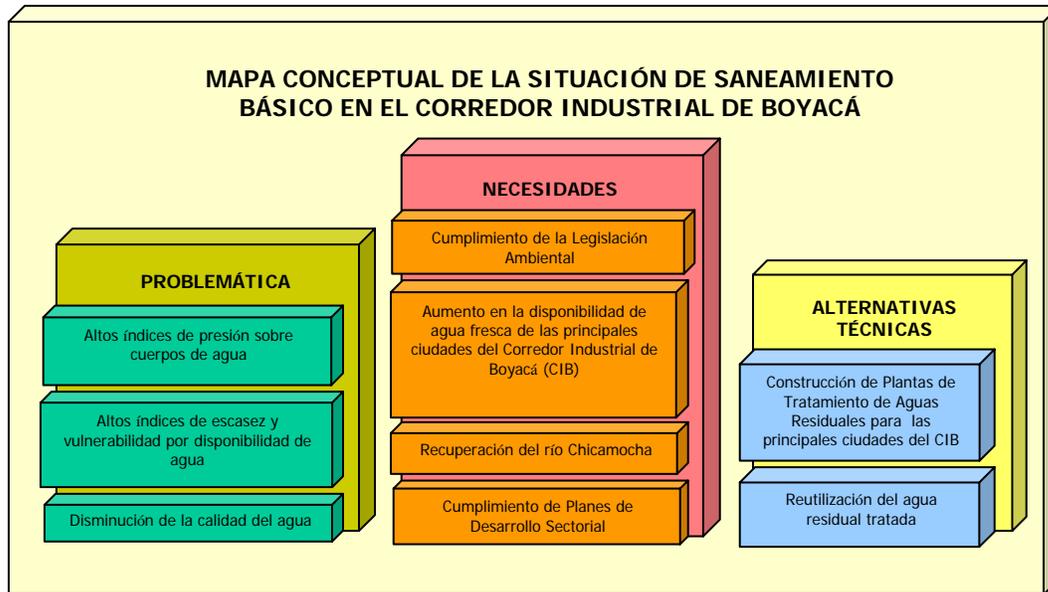
La desertificación y destrucción de los reguladores naturales del recurso hídrico (entre ellos los páramos de alta montaña), sumado al deterioro severo y aumento progresivo de la extracción de las cuencas hídricas, hacen del departamento de Boyacá un territorio con altos índices de escasez de agua. Un ejemplo de ello fue el que se vivió durante el periodo de sequía que inició en 1989 y finalizó con las lluvias en 1994. En el transcurso de este periodo de tiempo, se secaron varios ríos y quebradas, entre ellos el río Chiquinquirá, incluyendo los aljibes y pequeños lagos construidos por la población a

lo largo de la meseta Cundiboyacense. En esta zona se encuentra la ciudad de Tunja, capital del departamento de Boyacá, y cuyo principal problema es el abastecimiento de agua[35].

Durante los periodos de sequía prolongada, la demanda de agua fresca supera la capacidad ofrecida por el sistema hídrico del que la ciudad se abastece, reflejándose en los índices de escasez de agua. El estudio realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM en el año 2000, revelaba que la ciudad de Tunja presentaba una relación aproximada de Demanda/Oferta de 2.4 veces.

Este escenario evidencia la necesidad de la región de implementar planes de acción que permitan implementar programas de protección y recuperación de los cuerpos naturales de agua, así como proyectos enfocados a la construcción de la infraestructura requerida para el tratamiento y reutilización del agua residual. Asimismo, es requerimiento de las políticas de desarrollo el apego y cumplimiento de los límites de emisiones y descargas contaminantes marcadas en la legislación ambiental colombiana, y de las metas de descontaminación acordadas con las autoridades ambientales de la región.

Existen diferentes frentes de acción, desde los cuales se podría tratar la reducción en la disponibilidad hídrica en el departamento. Se encuentran dentro de las alternativas tanto preventivas como curativas, el desarrollo de programas de protección y recuperación de zonas deforestadas y de los cuerpos naturales de agua, el desarrollo de programas de toma de conciencia del uso racional y eficiente del agua en la población, financiamiento y desarrollo de proyectos de construcción de la infraestructura necesaria para el tratamiento y reutilización del agua residual de origen doméstico, entre otros. En la ilustración 4 se presenta un mapa conceptual de la identificación de la problemática hídrica, necesidades y alternativas técnicas, que contribuirían al aumento de la disponibilidad de agua fresca en los cuerpos de agua.



**Ilustración 4. Identificación de la problemática, necesidades y alternativas, para la situación de Saneamiento Básico en el Corredor Industrial de Boyacá.**

Históricamente en el departamento de Boyacá, la atención y preocupación sobre la disponibilidad del recurso hídrico ha sido enfocada en la cuenca del río Chicamocha, por representar la base de la economía del departamento y sustento de su población. Recientemente, la atención se ha centrado en el sector correspondiente a la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá CORPOBOYACÁ, ya que este sector comprende cerca de un 62% de los municipios de la cuenca del río Chicamocha, y en términos de contaminación representa un poco más de un 80% de los vertimientos puntuales de naturaleza doméstica que se aportan al río.

Fue así como a Corporación adelantó un trabajo de recopilación de información y de análisis con respecto a la situación hídrica del río Chicamocha, definió metas de descontaminación para la cuenca y desarrolló un programa encaminado a apoyar a los municipios en la elaboración de estudios dirigidos a determinar alternativas de tratamiento de aguas residuales municipales, a partir de diagnósticos serios sobre la infraestructura y manejo que se está dando al recurso en los cascos urbanos.

### **3.1.5 Alternativas generales de solución para la problemática hídrica del departamento de Boyacá**

Para proponer las opciones generales de solución a la problemática social y ambiental identificada de escasez hídrica en la región industrial del departamento de Boyacá, se tomaron en cuenta aquellas que permitieran aumentar la disponibilidad de agua fresca para el abastecimiento de la población del Tunja.

Como opciones generales de solución tenemos en primer lugar la búsqueda de fuentes (cuerpos de agua) alternativas de agua potable para abastecer a la población a futuro. Esta opción, si bien mitiga el impacto de los altos índices de escasez de agua fresca en la región, no resuelve el problema asociado a la contaminación ambiental proveniente de la generación y disposición directa del agua residual generada a los cuerpos de agua.

Como segunda opción se planteó instalar y operar una planta de tratamiento de aguas residuales y retorno del agua descontaminada al río, para recarga de los cuerpos naturales de agua. En tercera opción se encuentra la instalación y operación de una planta de tratamiento de aguas residuales y reutilización del agua tratada para actividades de riego agrícola y actividades industriales menores. Esta tercera opción es la que en mayor medida se acerca a los principios de desarrollo sostenible.

En la ilustración 5 se desglosan las opciones generales propuestas como soluciones viables a la problemática de escasez de agua fresca en la región del Corredor Industrial de Boyacá. Para cada una de las tres opciones generales se describen las características de implementación, tomando en cuenta los efectos de cada una con relación a la obtención de las condiciones propicias para alcanzar un desarrollo sostenible en la región.

## ALTERNATIVAS GENERALES DE SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA EN LOS MUNICIPIOS DEL CORREDOR INDUSTRIAL DE BOYACÁ

### INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, CON RETORNO DEL AGUA TRATADA AL RÍO CHICAMOCHA

#### CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTACIÓN

1. Abastecimiento de agua tratada de forma permanente.
2. Inversión en sistemas de tratamiento de aguas residuales, al igual que en sistemas de alcantarillado.
3. Aumento en la capacidad de autorregulación hídrica de la región, y disminución en los índices de escasez.
4. Cumplimiento con el Plan de Descontaminación del río Chicamocha.
5. Disminución en el pago de las tasas retributivas por vertimientos puntuales.
6. Alternativa de solución de mayor impacto y duración, ante el problema de escasez de agua fresca en la región.
7. Mejoramiento en la calidad hídrica del río Chicamocha.
8. Alternativa que estimula el desarrollo económico de la región (especialmente agrícola).
9. Recarga de los cuerpos naturales de agua.
10. Cargo de los costos de inversión, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento al usuario del servicio.
11. Generación de composta para empleo en actividades de agricultura.

### EMPLEO DE FUENTES DIFERENTES A LAS TRADICIONALES ALTERNATIVAS, PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA FRESCA AL MUNICIPIO

#### CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTACIÓN

1. Abastecimiento de agua durante el tiempo en que el cuerpo de agua se pueda autorregular.
2. Inversión en sistemas de bombeo y transporte para grandes distancias.
3. Influencia desfavorable sobre la capacidad de regulación hídrica de las regiones vecinas.
4. Incumplimiento del Plan de Descontaminación del río Chicamocha.
5. Continuación con el pago de las tasas retributivas por vertimientos de agua residual al río.
6. Solución parcial y temporal del aumento en los índices de escasez hídrica de la región.
7. Alternativa en detrimento de la calidad de vida y desarrollo económico de las regiones abastecedoras de agua fresca.
8. Aumento de la presión hídrica de los cuerpos naturales de agua que se conviertan en fuentes nuevas de agua fresca para el municipio.

### INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, CON REUTILIZACIÓN DEL AGUA TRATADA

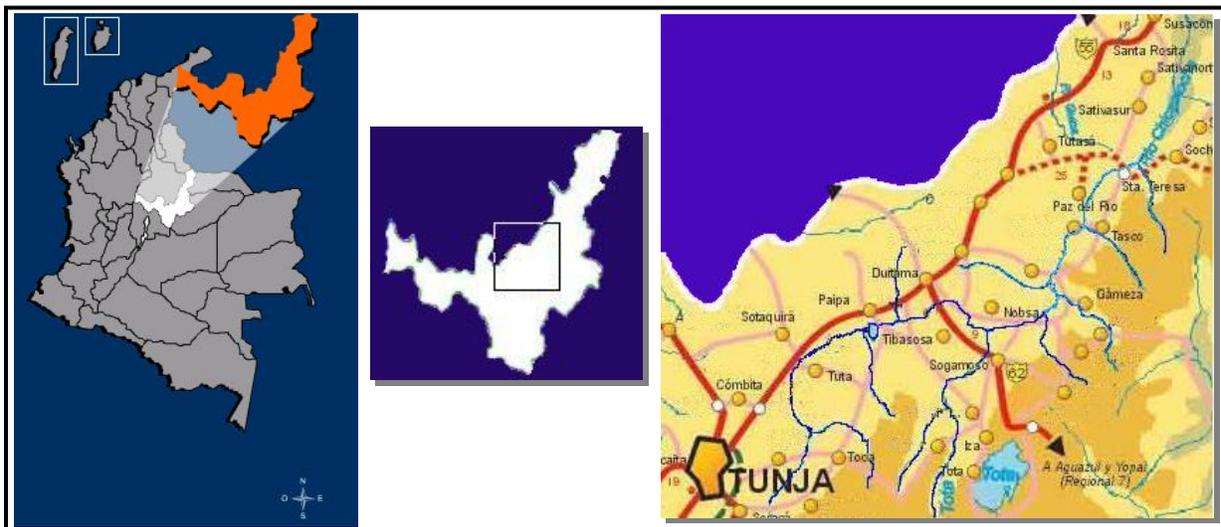
#### CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTACIÓN

1. Abastecimiento de agua tratada en forma permanente.
2. Inversión en sistemas de tratamiento de aguas residuales, al igual que en sistemas de alcantarillado, almacenamiento y distribución de agua tratada.
3. Aumento en la capacidad de autorregulación hídrica de la región, y disminución en los índices de escasez.
4. Cumplimiento con el Plan de Descontaminación del río Chicamocha.
5. Disminución en el pago de las tasas retributivas por vertimientos puntuales.
6. Alternativa de solución de mayor impacto y duración, ante el problema de escasez de agua fresca en la región.
7. Mejoramiento en la calidad hídrica del río Chicamocha.
8. Alternativa que estimula el desarrollo económico de la región (especialmente agrícola).
9. Recarga de los cuerpos naturales de agua, y reutilización del agua tratada en actividades agrícolas e industriales menores.
10. Cargo de los costos de inversión, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento al usuario del servicio.
11. Generación de composta para empleo en actividades de agricultura.
12. Disminución en el consumo de agua potable, empleada en actividades industriales, servicios, ornato, limpieza, etc.

**Ilustración 5. Alternativas generales de solución a la problemática de escasez de agua fresca en el Corredor Industrial de Boyacá**

### 3.2 ANÁLISIS DEL NIVEL DE PRIORIDAD DE LOS MUNICIPIOS

En la realización de este trabajo de tesis, el análisis del carácter prioritario ante el desarrollo de un programa de recuperación del recurso hídrico y aumento de la disponibilidad de agua fresca, se sustenta sobre un análisis de la necesidad de cada municipio del Corredor Industrial representada en el índice de escasez, el grado de contaminación sobre la cuenca hídrica, reflejada en la materia orgánica vertida al río Chicamocha en su cuenca alta, y la cantidad de agua residual generada por el municipio. Los municipios que se tomaron en cuenta son Tunja, Cóbbita, Tuta, Sotaquirá, Paipa, Duitama, Tibasosa, Nobsa y Sogamoso. Estos municipios se ubican sobre la cuenca alta del río Chicamocha, y conforman el denominado Corredor Industrial de Boyacá CIB, mostrado en la ilustración 6.



**Ilustración 6. Ubicación geográfica del Corredor Industrial de Boyacá y de la Cuenca Alta del río Chicamocha.**

La variable que hace referencia a la capacidad de financiación de proyectos de giro ambiental no se toma en cuenta, ya que los municipios tienen igual oportunidad de acceso a los recursos que se desprenden de los mecanismos diseñados por el gobierno y las corporaciones autónomas regionales para el financiamiento de los proyectos ambientales (tasas retributivas, fondos ambientales, transferencia de recursos, etc.).

En síntesis, las variables que intervienen en el análisis son:

- El índice de escasez para los municipios.
- El caudal generado de aguas residuales municipales.
- La concentración de DBO<sub>5</sub> arrojada al río Chicamocha.

### 3.2.1 Estimación del índice de escasez

El índice de escasez se toma como el estimado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), publicado en el Estudio Nacional del Agua 2000. En la Tabla 9 se presentan los valores del índice de escasez para los municipios del Corredor Industrial de Boyacá, correspondientes al año 2015 bajo condiciones hidroclimáticas de año seco.

**Tabla 9. Índices de escasez para los municipios del CIB para el año 2015 bajo condiciones hidrológicas de años seco**

MUNICIPIO	PROYECCIÓN 2015 DEL ÍNDICE DE ESCASEZ (AÑO SECO) %
TUNJA	397.41
CÓMBITA	17.19
DUITAMA	65.43
NOBSA	31.17
PAIPA	12.79
SOGAMOSO	101.97
SOTAQUIRÁ	13.88
TIBASOSA	146.85
TUTA	59.19

FUENTE: *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM* [30]

### 3.2.2 Estimación del caudal generado de aguas residuales municipales

En la estimación del caudal de aguas residuales municipales se tomó como caudal de retorno el valor de 160 L/hab\*dia, reportado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Para la estimación de la población correspondiente al año 2015 se emplearon la tasa de crecimiento media anual[10] reportada por el Departamento Nacional de Estadística para el departamento de Boyacá, correspondiente al 0.58%.

El porcentaje de cobertura de alcantarillado urbano, clasificado por distribución de población, reportado por el Ministerio de Desarrollo en 1998 se muestra en la Tabla 10. Para el estimado de población cubierta por alcantarillado urbano en el año 2015, se supone un aumento en 5 puntos porcentuales en la cobertura.

**Tabla 10. Porcentaje de cobertura de alcantarillado urbano 1998 por distribución de población**

DISTRIBUCIÓN DE POBLACIÓN	PORCENTAJE DE COBERTURA DE ALCANTARILLADO URBANO 1998	PORCENTAJE ESTIMADO DE COBERTURA DE ALCANTARILLADO URBANO 2015
>100 mil capital	80%	85%
>70 mil	77%	82%
30 - 70 mil	70%	75%
12 - 30 mil	69%	74%
2,5 - 12 mil	71%	76%
0 - 2,5 mil	85%	90%

FUENTE: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS [4]

El caudal generado de aguas residuales municipales se calculó de la siguiente manera:

$$Q_G = Q_R * C * P \quad (1)$$

en donde:

$Q_G$  : representa el caudal de aguas residuales generado por el municipio

$Q_R$  : representa el caudal de retorno *per cápita*

$C$  : es el porcentaje de cobertura de alcantarillado

$P$  : representa el número de habitantes del municipio

En la Tabla 11 se presentan los estimados de caudal de aguas residuales, que generarían los municipios integrantes del CIB para el año 2015.

**Tabla 11. Estimado de flujo de aguas residuales para el año 2015 para los municipios del CIB**

MUNICIPIO	POBLACIÓN URBANA 2004 <i>hab</i>	POBLACIÓN URBANA 2015 <i>hab</i>	POBLACIÓN CUBIERTA POR ALCANTARILLADO <i>hab</i>	ESTIMADO CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS <i>m<sup>3</sup>/día</i>
TUNJA	116,420	124,067	105,457	16,873
CÓMBITA	975	1,039	935	150
DUITAMA	90,440	96,380	79,032	12,645

MUNICIPIO	POBLACIÓN URBANA 2004 <i>hab</i>	POBLACIÓN URBANA 2015 <i>hab</i>	POBLACIÓN CUBIERTA POR ALCANTARILLADO <i>hab</i>	ESTIMADO CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS <i>m<sup>3</sup>/día</i>
NOBSA	3,329	3,548	2,364	378
PAIPA	13,346	14,223	10,525	1,684
SOGAMOSO	123,392	131,497	107,827	17,252
SOTAQUIRÁ	1,280	1,364	1,228	197
TIBASOSA	3,494	3,723	2,830	453
TUTA	1,617	1,723	1,551	248

### 3.2.3 Carga y concentraciones de materia orgánica aportadas por los municipios al río Chicamocha

La concentración de DBO<sub>5</sub> presente en el río Chicamocha registrada por las diferentes estaciones de monitoreo, se toma como un indicador del estado ambiental del río. Uno de los factores que influye en este estado ambiental es el aporte de carga orgánica por parte de los municipios asociados a las estaciones de monitoreo del río. Por lo tanto, se emplea como criterio de selección de la localización de la planta de tratamiento de agua residual municipal, siendo congruentes con el objetivo de la recuperación de la cuenca.

Tabla 12. Estimado de carga y concentraciones de DBO<sub>5</sub> a lo largo de la cuenca alta del río Chicamocha

ESTACIÓN DE MONITOREO	DIST. APROX. <i>km</i>	CAUDAL PROMEDIO <i>(m<sup>3</sup>/s)</i>	CONCENTRA. DBO <sub>5</sub> <i>(mg/l)</i>	CARGA DE DBO <sub>5</sub> <i>(kg/día)</i>	MUNICIPIO ASOCIADO
La arboleda	5	0.62	104.6	5,603	TUNJA
Playa arriba	16	0.25	23.1	500	-
Playa abajo	25	0.49	11.4	483	CÓMBITA
La Reforma	44	3.48	2.9	872	TUTA, SOTAQUIRÁ
Termopaipa	53	4.22	2.9	1,057	-
La Siberia	57	3.97	5.1	1,750	PAIPA
San Rafael	74	6.05	3.1	1620	DUITAMA, TIBASOSA
Puente Chámeza	95	8.4	20.7	15,023	NOBSA, SOGAMOSO
Vado Castro	100	8.3	29.2	20,940	NOBSA, SOGAMOSO

FUENTE: Corporación Autónoma Regional de Boyacá CORPOBOYACÁ [7]

La información necesaria está reportada por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá CORPOBOYACÁ, en el informe sobre calidad hídrica y tasas retributivas por

vertimientos hídricos puntuales[7], en el cual se presenta la calidad promedio del agua del río Chicamocha. Para efectos de este estudio se tomaron los datos de caudales promedio y concentraciones promedio de DBO<sub>5</sub>. En la Tabla 12 se muestran las concentraciones registradas en las distintas estaciones de monitoreo, las cargas estimadas y los municipios asociados a cada estación.

### 3.2.4 Prioridad de desarrollo hídrico-ambiental

Una vez se cuenta con la información referente a los criterios de selección escogidos, se construye una matriz que permita visualizar la situación de los diferentes municipios del Corredor, como la que se presenta en la Tabla 13.

**Tabla 13. Matriz de variables de selección para los municipios del Corredor Industrial de Boyacá**

MUNICIPIO	ÍNDICE DE ESCASEZ %	CAUDAL $m^3/día$	CONCENTRACIÓN $mg/l$
TUNJA	397.41	16,873	104.6
COMBITA	17.19	150	11.4
DUITAMA	65.43	12,645	11.4
NOBSA	31.17	378	2.9
PAIPA	12.79	1,684	2.9
SOGAMOSO	101.97	17,252	5.1
SOTAQUIRÁ	13.88	197	3.1
TIBASOSA	146.85	453	20.7
TUTA	59.19	248	29.2

Para determinar cuál es el municipio que presenta una prioridad más alta para el desarrollo de programas de recuperación hídrica, se asigna un peso a cada uno de los tres criterios escogidos. Estos pesos son asignados por el proyectista teniendo en cuenta la influencia de cada factor sobre el objetivo de la selección. Esta influencia esta ligada a los criterios señalados por el gobierno colombiano en su política de selección de proyectos de recuperación hídrica. En nuestro caso la calificación se establece según los rangos elegidos, basados en el orden de magnitud de los datos con los que se cuentan de los criterios para los diferentes municipios, que en este caso en particular son:

**Tabla 14. Calificaciones para la influencia de los criterios en la selección**

<b>GRADO DE INFLUENCIA</b>	<b>VALOR PARA CALIFICACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS CRITERIOS</b>
MUY ALTA	4
ALTA	3
MEDIA	2
BAJA	1

Por lo tanto, la calificación de peso para los criterios de caudal, concentración e índice de escasez es establecida, resultado que se presenta en la Tabla 15. Hay que recordar que esta distribución de valores o pesos, está sujeta a las características particulares de la situación que rodea al proyecto en el momento de la formulación. Lo anterior significa que un cambio en las necesidades de la población, una reforma a la política ambiental, un cambio en la dinámica económica de la región o del país, hará que la distribución de los pesos y la influencia de los factores cambien acordes al ambiente que rodea al proyecto.

**Tabla 15. Pesos asignados a los criterios de selección**

<b>PESO DE LOS CRITERIOS EN LA ELECCIÓN DEL MUNICIPIO CON MAYOR PRIORIDAD DE DESARROLLO HÍDRICO-AMBIENTAL</b>	
CAUDAL	3
CONCENTRACIÓN	2
ÍNDICE DE ESCASEZ	4

Posteriormente, según el grado de interés e influencia de cada factor en la selección de la prioridad de realización del proyecto hídrico ambiental, se valora cada criterio en las alternativas disponibles. Al igual que con los pesos de los criterios, en este caso se asigna un valor a cada criterio para cada alternativa, siguiendo la clasificación mostrada en la Tabla 16, elegida como conveniente para el rango de valores que se manejan.

Una vez se han determinado los pesos de cada factor y se tiene la matriz de valoración de las alternativas (mostrada en la Tabla 17), se estima el efecto de los criterios sobre las alternativas elegidas, por medio de la ponderación de los valores de cada alternativa. Posteriormente, por comparación con las otras alternativas se asigna la prioridad, siendo la del número más alto la que presente mayor prioridad para la inversión en proyectos de descontaminación hídrico-ambiental.

**Tabla 16. Rangos y peso de los criterios de selección**

VALOR DE PESO	RANGO PARA EL ÍNDICE DE ESCASEZ %	RANGO PARA EL CAUDAL $m^3/día$	RANGO PARA LA CONCENTRACIÓN DE DBO <sub>5</sub> (mg/l)
6	Mayor a 200	Mayor a 15,000	Mayor a 100
5	101 - 200	10,001 – 15,000	80.1 - 100
4	81 - 100	5,001 – 10,000	50.1 - 80
3	51 - 80	1,001 – 5,000	20.1 - 50
2	20 - 50	501 – 1,000	10.1 – 20
1	Menor a 20	Menor a 500	Menor a 10

**Tabla 17. Matriz de valoración para las alternativas de selección**

ALTERNATIVA	CAUDAL	CONCENTRACIÓN	ÍNDICE DE ESCASEZ
TUNJA	6	6	6
COMBITA	1	1	2
DUITAMA	3	5	2
NOBSA	2	1	1
PAIPA	1	2	1
SOGAMOSO	5	6	1
SOTAQUIRÁ	1	1	1
TIBASOSA	5	1	3
TUTA	3	1	3

Los resultados de este ejercicio, mostrados en la Tabla 18, arrojan a la ciudad de Tunja como la seleccionada para el desarrollo del proyecto, con un valor ponderado de 6.0, y por lo tanto una prioridad 1. En segundo lugar se encuentra la ciudad de Sogamoso, con un valor ponderado de 3.4.

**Tabla 18. Resultado de la ponderación de las calificaciones para las alternativas**

MUNICIPIO	CAUDAL	CONCENTRACIÓN	ESCASEZ	VALOR PONDERADO	PRIORIDAD
TUNJA	6	6	6	6.0	1
COMBITA	1	1	2	1.4	6
DUITAMA	3	5	2	3.0	4
NOBSA	2	1	1	1.3	7
PAIPA	1	2	1	1.2	8
SOGAMOSO	5	6	1	3.4	2
SOTAQUIRÁ	1	1	1	1.0	9
TIBASOSA	5	1	3	3.2	3
TUTA	3	1	3	2.6	5

El resultado que se obtiene de esta selección de alternativas municipales, nos permite determinar, en el caso del desarrollo de una planta de tratamiento de aguas residuales, información acerca del tamaño de la planta, características del agua negra generada, necesidades específicas de la localidad, que en este caso corresponde al municipio de Tunja, entre otros datos básicos para el desarrollo de algún proyecto.

En el año 2,000 la demanda hídrica anual de la población de Tunja era de 9.8 millones de metros cúbicos (MMC), mientras que la oferta reducida para año medio era de 17.8 MMC, situándose por arriba de la demanda. Esta situación cambia cuando se trata de condiciones de año seco, en donde la oferta efectiva de agua fue de 4.1 MMC, presentándose un déficit de agua de alrededor de 5.7 MMC. A medida que la población aumenta, la disminución en la oferta hídrica reducida o efectiva se acentúa, debido al aumento en la demanda de agua y al aumento en la cantidad de material contaminante generado por la población y vertido a los cuerpos de agua.

Para el año 2004 se estimaba que la ciudad de Tunja contaba con una población cercana a los 116,500 habitantes, de los cuales alrededor del 80% cuenta con servicio de alcantarillado, esto equivale a unos 93,200 habitantes. Tomando un caudal de retorno de  $160 \text{ L/hab} \cdot \text{día}$ , valor reportado por el CEPIS y otros, en el informe titulado Evaluación de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento 2000 en las Américas, Colombia[4], se tiene un caudal estimado de aguas residuales municipales generado de 5.5 MMC/año.

Esta cantidad de agua residual al ser tratada y regresada a los cuerpos naturales o reciclada en actividades comerciales, impactarían positivamente en gran medida en el aumento de la disponibilidad de agua fresca para el municipio, disminuyendo así su vulnerabilidad por disponibilidad hídrica.

Ante la inexistencia de otra instalación que trate el agua residual municipal generada, la planta de tratamiento que se propone cubrirá el tratamiento de aproximadamente toda el agua residual proveniente del municipio, siendo ésta alrededor de  $197 \text{ L/s}$ .

## **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS**

El siguiente capítulo está basado en el trabajo desarrollado por el *Instituto Mexicano del Petróleo y Petróleos Mexicanos*[22] sobre metodologías para la evaluación de alternativas tecnológicas de forma integral, en el cual se exponen ampliamente conceptos, principios y metodología para la evaluación de alternativas tecnológicas en la realización de proyectos de refinación del petróleo. Este capítulo se enfoca principalmente al aspecto conceptual del desarrollo de la metodología para la evaluación de alternativas tecnológicas desarrollado en dicho trabajo, y que por su estructura se puede aplicar en una forma un poco más amplia a un proyecto de tratamiento de aguas residuales, o en un momento dado a cualquier proyecto que enfrente la selección y evaluación de diferentes tecnologías de proceso.

En forma general se puede decir que el proceso de evaluación de alternativas tecnológicas en proyectos de inversión, consiste en una actividad que busca sistemáticamente identificar las características integrales que son relevantes y se asocian a los proyectos de inversión, cuyo objetivo es el de lograr una decisión que brinde el mejor balance entre los beneficios económicos y financieros y la calidad de los servicios recibidos, y los compromisos contraídos por el otro.

### **4.1 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA**

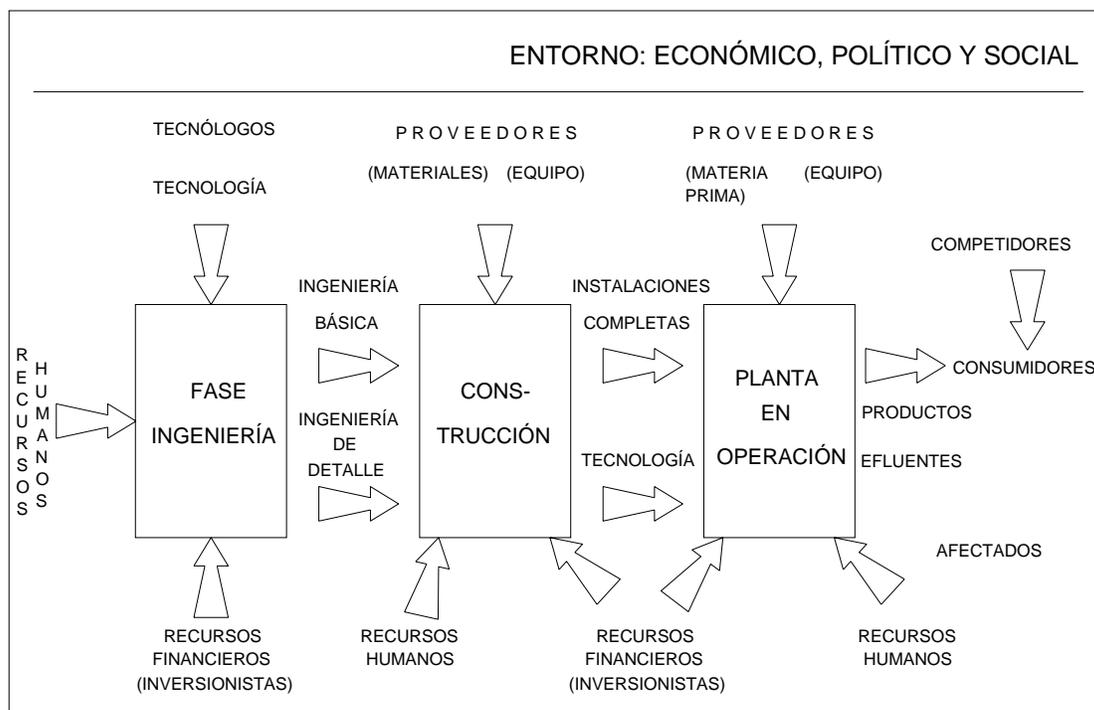
El desarrollo de un modelo de evaluación para la evaluación de alternativas tecnológicas, puede realizarse con la ejecución de cuatro etapas principales[22]:

- Identificación de los criterios que afectan la selección de la alternativa
- Clasificación de todos los criterios identificados
- Formulación de un modelo en términos de la clasificación
- Cuantificación de los términos del modelo formulado

Basados en el panorama ofrecido por la aplicación de un *enfoque de sistemas* a la ejecución y operación de un proyecto, representada en la Ilustración 7, se pueden

identificar los siguientes criterios de evaluación o *aspectos* como los denominan los autores:

- Aspectos técnicos del proceso
- Aspectos técnicos complementarios
- Aspectos económico-financieros
- Aspectos contractuales
- Aspectos plausibles
- Aspectos estratégico-tácticos
- Aspectos normativos



**Ilustración 7. Visión ampliada de un proyecto. FUENTE: IMP y PEMEX Refinación [22]**

La selección de los anteriores aspectos incluye la mayoría de posibilidades que se pueden presentar en un proyecto de inversión, y permiten en gran medida la realización de una evaluación integral de las alternativas tecnológicas.

Dentro del establecimiento de una metodología de evaluación, los autores identifican como paso posterior el desglose de cada uno de los aspectos identificados, en el cual se identifiquen y agrupen los criterios o *factores* que van a ser considerados. La

siguiente es la descripción de los aspectos que se consideran en la metodología que se propuso, al igual que los *subaspectos* y factores que cada aspecto evalúa:

#### **4.1.1 Aspectos técnicos del proceso**

Estos aspectos consideran las características de la tecnología desde el punto de vista de proceso, en el ámbito de ingeniería básica. Las diferencias entre los aspectos técnicos de varias tecnologías, tiene una alta repercusión sobre el comportamiento económico del proyecto, al igual que posibles efectos en el medio ambiente, lo que pueden ofrecer ventajas competitivas, y deben ser cuantificadas en la medida de lo posible. Los subaspectos y factores que contempla la evaluación de los aspectos técnicos son:

##### **a. Concordancia del proceso con las bases de diseño**

- Capacidad y factor de servicio
- Especificaciones de materias primas
- Especificaciones de productos
- Condiciones en límites de batería
- Disponibilidad de servicios auxiliares
- Consideraciones de diseño
- Flexibilidad

##### **b. Características relevantes del proceso**

- Esquema de proceso
- Equipo
- Condiciones de operación
- Rendimientos
- Características especiales de los productos
- Tratamientos necesarios previos o posteriores
- Integración térmica

##### **c. Actualización del proceso (obsolescencia)**

##### **d. Flexibilidad del proceso**

- Materia prima
- Capacidad de operación (caso crítico)
- Número de equipos de relevo
- Automatización
- Efecto en la inversión y en los gastos de operación

##### **e. Consumo de materias primas**

##### **f. Consumo de servicios auxiliares**

##### **g. Consumo de químicos y catalizadores**

**h. Mano de obra requerida**

- Operación
- Mantenimiento
- Laboratorio

**i. Tratamiento de efluentes**

- Normas
- Sistemas de tratamiento

**j. Impacto ecológico de la tecnología**

**k. Riesgos implícitos en la tecnología y sistemas de seguridad**

**4.1.2 Aspectos técnicos complementarios**

Dentro de estos aspectos se agrupan aquellos criterios que no hacen parte directa de las características de la tecnología, pero que tienen un efecto de confianza sobre el buen funcionamiento de la tecnología durante la operación de la planta. Se evalúan básicamente la experiencia de los diferentes tecnólogos, su capacidad organizacional, el tipo y alcance de los servicios que están ofertando, contenido del paquete de tecnología que se va a transferir (ingeniería básica, ingeniería de detalle, etc.), entre otros. En algunas ocasiones pueden ser el factor dominante. Los subaspectos y factores que abarca la evaluación de los aspectos técnicos complementarios son:

**a. Experiencia técnica-administrativa del licenciador**

- Número, capacidad y fecha de plantas diseñadas, en operación y en construcción
- Número de plantas en fase de diseño
- Experiencia en fabricación de equipos especiales

**b. Experiencia general de los licenciadores en ingeniería, en construcción, en operación, y en administración de proyectos**

**c. Información técnica**

- Alcance del Paquete de Diseño de Proceso ó el Paquete de Ingeniería Básica (dependerá de los servicios solicitados)
- Calidad de la información técnica suministrada

**d. Servicios profesionales adicionales y experiencia**

- Procura (nacional y en el extranjero)
- Supervisión de la expeditación y embarque (nacional y en el extranjero)
- Supervisión técnica durante la construcción
- Supervisión de la ingeniería de detalle

- Capacitación del personal
- Soporte de sistemas de control para la automatización del proceso
- Supervisión en arranque, pruebas de garantías, y operación

**e. Características generales**

- Estructura organizacional
- Recursos materiales y humanos
- Disponibilidad de horas-hombre

**f. Programas de trabajo de los servicios ofertados**

- Paquete tecnológico
- Servicios profesionales adicionales

**g. Certificación del sistema de aseguramiento de calidad**

**4.1.3 Aspectos económico-financieros**

Estos aspectos permiten definir los niveles de recuperación de la inversión y las utilidades esperadas durante la operación de la planta. El sector inversionista privado hace mucho énfasis en dichos aspectos, considerándolos de vital importancia. Los subaspectos y factores que abarca la evaluación de los aspectos económico-financieros son:

**a. Inversión en terreno, edificios, materiales y equipo**

**b. Capital de trabajo**

**c. Economía intrínseca del proceso**

- Materias primas
- Productos
- Servicios auxiliares
- Catalizadores
- Reactivos químicos
- Mano de obra
- Depreciación

**d. Costos y forma de pago de los servicios de ingeniería, licenciamiento y servicios profesionales adicionales**

**e. Parámetros de rentabilidad del proyecto**

- Tasa interna de retorno (TIR)
- Valor presente neto (VPN)
- Flujo de efectivo descontado

- Relación beneficio/costo
- Valor Terminal
- Tasa de rendimiento promedio
- Periodo de retorno de la inversión

**f. Sensibilidad de la rentabilidad del proyecto a:**

- Materia prima
- Precio del producto
- Inversión
- Nivel de producción (punto de equilibrio)
- Financiamiento externo

#### **4.1.4 Aspectos contractuales**

Estos aspectos agrupan aquellas características relacionadas con la transferencia de tecnología y los servicios ofertados por el tecnólogo, como lo son las obligaciones, derechos, restricciones, garantías, penalidades, etc. Estos aspectos contractuales pueden llegar dado el caso, a limitar la capacidad de realizar mejoras al proceso productivo en la etapa de operación, y a repercutir económicamente debido al nivel de regalías y la forma de pago de las mismas. Los autores proponen que se consideren los siguientes subaspectos y factores para el análisis:

**a. Licencia y tecnología**

- Obligaciones
- Derechos
- Restricciones
- Secrecía
- Derechos de patente
- Forma de pago
- Exclusividad (regional, nacional, internacional)
- Temporalidad

**b. Garantía de la información técnica**

- Tipo, nivel y calidad
- Fechas de entrega

**c. Alcance de los servicios técnicos profesionales adicionales**

- Capacitación del personal
- Responsabilidad del licenciador en la supervisión de la ingeniería de detalle
- Responsabilidad del licenciador en la supervisión de la construcción
- Criterios y procedimientos para pruebas de comportamiento de la planta

**d. Garantías de funcionamiento del proceso**

- Capacidad de la planta

- Consumo de materias primas
- Consumo de servicios auxiliares
- Consumo de agentes químicos
- Consumo de catalizadores
- Especificaciones de los productos
- Características de los efluentes
- Periodo de operación continua de la planta

**e. Penalidades por incumplimientos**

**f. Confidencialidad de la información**

**g. Acceso a nuevos desarrollos**

**h. Leyes que rigen el contrato**

#### **4.1.5 Aspectos plausibles**

En estos aspectos se agrupan criterios como los macro-económicos, sociales y ecológicos que pudieran llegar a influir en la evaluación de un proyecto de inversión. El término plausible empleado por los autores, refleja la idea de que si los proyectos fueran evaluados bajo dichos parámetros (en donde se espera la percepción de beneficios sociales, macro-económicos, económicos, ambientales, etc.), serían *aplaudibles* o dignos de aplauso.

**a. Criterios de mercado**

- Substitución de importaciones
- Demanda nueva
- Exportación

**b. Criterios macro-económicos y sociales**

- Beneficios regionales (descentralización, distribución del ingreso, uso de materias primas regionales, etc.)
- Generación de actividad económica
- Integración de proyectos a los planes nacionales (de desarrollo, tecnológicos, etc.)
- Generación de empleos
- Balanza de pagos

**c. Criterios económico-financieros**

- Inversión (tipo, origen, composición, magnitud)
- Insumos nacionales y valor agregado
- Rotación de capital (ventas/inversión total)
- Liquidez (capital de trabajo/inversión fija)
- Costeo incremental
- Relación producto-capital

- Ocupación por unidad de capital

**d. Criterios tecnológicos**

- Disponibilidad de la tecnología (nacional ó extranjera, número de tecnólogos, alternativas existentes, antigüedad de las patentes, etc.)
- Sensibilidad a la escala
- Características intrínsecas de la tecnología (potencial de adaptación, de asimilación, dependencia futura, grado de sofisticación)
- Impacto Ecológico de la tecnología (contaminación, manejo de materiales tóxicos, carcinogénicos o peligrosos, aspectos eco-sociales, etc.)

**4.1.6 Aspectos estratégico-tácticos**

La inclusión de este aspecto es de gran importancia, en la medida en que la tecnología que se vaya a adquirir debe ser congruente con la estrategia tecnológica del proyecto, y esta a su vez con la estrategia general del negocio. En este grupo de criterios se incluyen a los tácticos, por tener un efecto en el buen desempeño del negocio, entre los que se pueden citar:

- a. Usar tecnologías de punta.** Representa la filosofía de usar únicamente tecnologías de punta, ya sea por prevenir una obsolescencia prematura, o por brindar una imagen de liderazgo en el campo.
- b. Usar tecnologías** que incluyan en la transferencia la ventaja comercial de participar en forma directa en ciertos mercados ya sean nacionales o internacionales.
- c. Usar tecnologías que provengan de un tecnólogo con el que se hayan tenido o se tenga contacto anterior.** Este criterio refleja ventajas que trae el negociar el monto de las regalías con un tecnólogo conocido, o aquellas que se desprenden de tener plantas de la misma tecnología, como es la aceleración en la curva de aprendizaje para la nueva planta, reflejándose en posibles ahorros en el mantenimiento y reposición de equipo.
- d. Usar tecnologías ofertadas como “llave en mano”.** Este criterio se refiere a la ventaja que se puede obtener del tecnólogo, cuando no se cuenta con el equipo necesario de expertos para poder integrar el paquete tecnológico, o cuando no se desee la dilución de responsabilidad cuando éste se esté desagregando.
- e. Congruencia** de la tecnología con la estrategia tecnológica de la organización.

#### **4.1.7 Aspectos normativos**

Estos involucran la normatividad que puede regir un proyecto en sus diferentes fases. Estos aspectos tienen la característica de que funcionan en la modalidad “cumple o no cumple”, pero no hay que olvidar que algunas alternativas cumplen en mayor medida mientras otras escasamente cumplen. Entre éstos se encuentran:

- a. Leyes y reglamentos para compras del sector público**
- b. Tratados de libre comercio convenidos por el país**
- c. Leyes y reglamentos sobre propiedad industrial**
- d. Reglamentos sobre higiene y seguridad**
- e. Normas sobre el manejo de sustancias peligrosas**
- f. Normas ecológicas y de protección al medio ambiente**

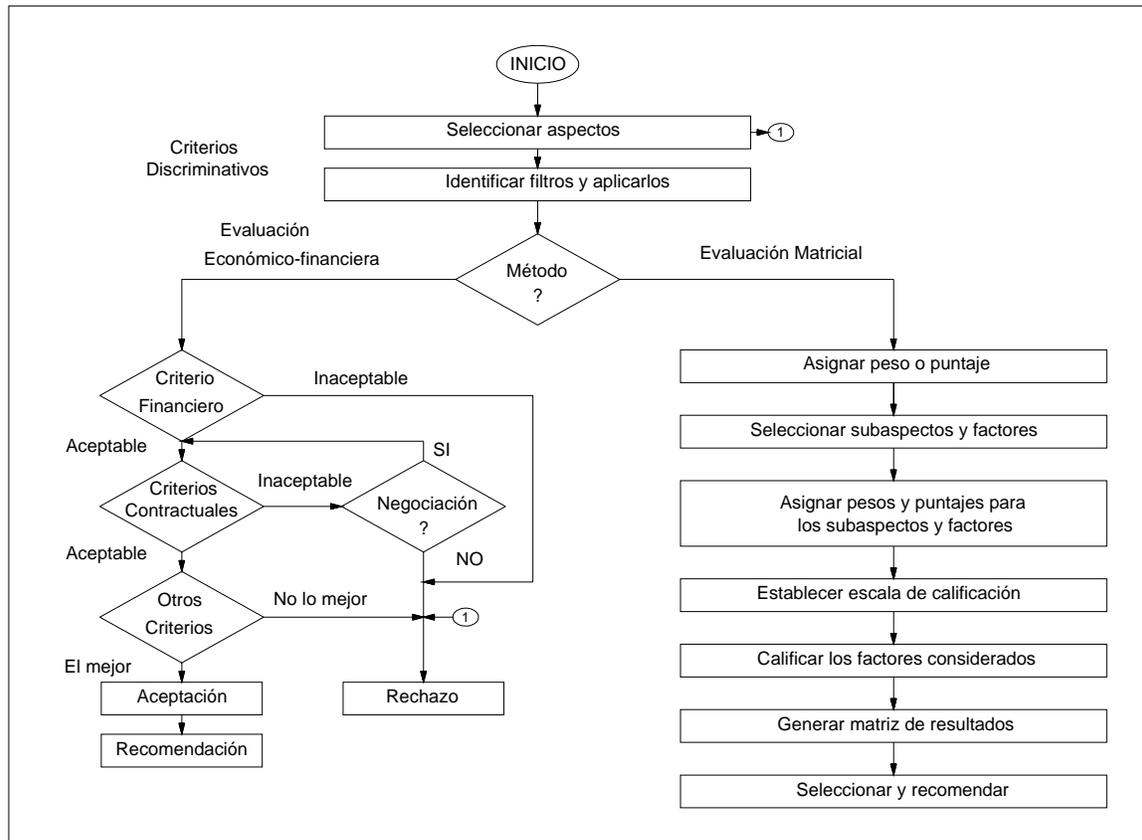
Una vez que se han establecido los criterios específicos a ser tomados en cuenta para la evaluación de las tecnologías para el proyecto, se requiere establecer la metodología de evaluación, en donde se integren y califiquen dichos criterios. Es importante resaltar que la aplicación de la metodología de ser realizada por personal especializado y multidisciplinario, con la formación profesional mínima en las áreas de procesos, ingeniería económica, ingeniería financiera, leyes y reglamentos (legal), y transferencia de tecnología.

#### **4.2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN**

La metodología propuesta por los autores toma como base la evaluación de los siete aspectos anteriormente mencionados, al igual que emplea criterios restrictivos que funcionan como *filtros*, que ayudan a la discriminación de las alternativas tecnológicas que se pretenden evaluar. El uso de la discriminación inicial en esta metodología ofrece la ventaja de ahorrar esfuerzos en el proceso de evaluación. Posterior a dicha discriminación inicial, se procede a una evaluación *económico-financiera* o a una *matricial*.

Esta metodología posee la flexibilidad necesaria para poder ser aplicada a cualquier tipo de proyecto de inversión, en el cual se involucre tecnologías de proceso. Adicionalmente, esta metodología permite la elección de la técnica de análisis y comparación de alternativas con base en al tipo de proyecto y en la información

disponible. Los autores resaltan la gran flexibilidad que ofrece la metodología al ser considerada como una mezcla de técnicas *cuantitativas* como *cualitativas*. La metodología se puede representar esquemáticamente como se muestra en la ilustración 8.



**Ilustración 8. Metodología de evaluación de alternativas tecnológicas**

En el anterior esquema se ve sintetizado el siguiente procedimiento:

**a. Definición de los aspectos a considerar en la evaluación**

En este paso se define los aspectos que pueden ser considerados dentro de la evaluación de las alternativas ( $A_i$ ). Ver Tabla 19.

**Tabla 19. Aspectos a considerar en la evaluación**

<b>ASPECTO (A<sub>i</sub>)</b>	<b>DECISIÓN</b>
1. Evaluación técnica del proceso	Si/No
2. Evaluación de aspectos técnicos complementarios	Si/No
3. Evaluación económico-financiera	Si/No
4. Evaluación contractual	Si/No
5. Evaluación de aspectos plausibles	Si/No
6. Evaluación de aspectos estratégico-tácticos	Si/No
7. Evaluación de aspectos normativos	Si/No

FUENTE: IMP y PEMEX Refinación [22].

#### **b. Identificación de los subaspectos o factores filtro**

Dentro de los aspectos que se van a considerar, se identifican los subaspectos o factores que se van a usar como filtros. Estos criterios han de estar en congruencia con el alcance y naturaleza del proceso vinculado al proyecto. Se seleccionan tantos filtros como sea necesario. Como se menciona en el trabajo referenciado[22], estos filtros pueden ser obtenidos por *contrastación* (comparación), por *abstracción* (análisis de lo deseado), o por *imposición* (cumplimiento de directrices estratégicas o cumplimiento de la normatividad ambiental, legal, política, etc.)

#### **c. Decisión del tipo de evaluación**

Con base en la información disponible, se inclina por la utilización de un criterio económico-financiero como criterio discriminante para la evaluación. De no inclinar la evaluación hacia el aspecto económico-financiero, se ha de emplear la técnica matricial para la evaluación (punto f).

#### **d. Discriminación de alternativas**

Al escoger la técnica cuantitativa de la evaluación basada en el aspecto económico-financiero, se ha de tener en mente que las ventajas ofrecidas por las alternativas se puedan cuantificar, y que su efecto se refleja en el criterio seleccionado. Se establecen en este punto los valores mínimo o máximo esperados para los criterios, y se procede a discriminar las alternativas tecnológicas que no cumplan con el criterio económico-financiero, para pasar al punto e de la metodología.

**e. Comparación de alternativas**

En este punto se puede estar seguro de que las alternativas que han pasado reúnen las características técnicas y económicas satisfactorias, por lo que se pasa a compararlas con aquellas que se esté dispuesto a aceptar.

La información que hasta el momento se ha obtenido, permite decidir cuál de las alternativas es la más atractiva, además de cumplir con los requerimientos técnicos de proceso y contractuales solicitados. En los casos en que se presente similitud de conveniencia en todos los aspectos (económico, técnico y contractual), se recurre a la comparación de la experiencia del tecnólogo, que respalde cada propuesta (como número y capacidad de plantas en operación, en construcción, en diseño, años acumulados de operación de las plantas, etc.). Con la ejecución de esta etapa se concluye la evaluación basada en parámetros económico-financieros.

**f. Asignación del peso o puntaje de los aspectos**

Si por el contrario, es más conveniente el empleo de la técnica matricial (que representa un método cualitativo), el paso a seguir es la asignación del *peso* o puntaje a cada uno de los aspectos considerados ( $P_i$ ), en donde:

$$100 = \sum P_i \tag{2}$$

**g. Selección de los subaspectos y factores**

Para cada aspecto seleccionado, se establecen los subaspectos ( $SA_i$ ) y los factores ( $F_i$ ) que van a ser evaluados. Un ejemplo de ello es el que se presenta en la Tabla 20

**Tabla 20. Aspecto: "evaluación técnica del proceso"**

SUBASPECTO {(SA <sub>i</sub> )}	FACTORES (F <sub>i</sub> )	DECISIÓN Si/No
a.1 CONCORDANCIA DEL PROCESO CON LAS BASES DE DISEÑO	- Capacidad y factor de servicio - Especificaciones de materias primas - Condiciones en límites de batería - Etc.	
a.2 CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DEL PROCESO	- Equipo - Condiciones de operación - Rendimientos - Características especiales de los productos - Etc.	

SUBASPECTO {(SA <sub>i</sub> )}	FACTORES (F <sub>i</sub> )	DECISIÓN Si/No
a.3 ACTUALIZACIÓN DEL PROCESO		
a.4 FLEXIBILIDAD DEL PROCESO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materia prima</li> <li>- Capacidad de operación</li> <li>- Número de equipo de relevo</li> <li>- Automatización</li> <li>- Efecto en la inversión y en gastos de operación</li> </ul>	
a.5 CONSUMO DE MATERIAS PRIMAS, QUÍMICOS Y CATALIZADORES		
a.6 CONSUMO DE SERVICIOS AUXILIARES	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vapor (baja, media, alta)</li> <li>- Electricidad</li> <li>- Agua de enfriamiento</li> <li>- Etc.</li> </ul>	
a.7 MANO DE OBRA REQUERIDA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operación</li> <li>- Mantenimiento</li> <li>- Laboratorio</li> </ul>	
a.8 TRATAMIENTO DE EFLUENTES	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Normas</li> <li>- Sistemas de tratamiento</li> </ul>	
a.9 IMPACTO ECOLÓGICO DE LA TECNOLOGÍA		
a.10 RIESGOS IMPLÍCITOS EN LA TECNOLOGÍA		

FUENTE: IMP y PEMEX Refinación [22].

#### h. Definición de pesos para subaspectos y factores

Esta asignación de los pesos o puntajes para los subaspectos y factores, se realiza en forma de fracción y considerando que la suma debe ser uno:

$$1 = \sum Wi \quad (\text{para los subaspectos considerados}) \quad (3)$$

$$1 = \sum vi \quad (\text{para los factores considerados en cada subaspecto}) \quad (4)$$

#### i. Establecimiento de la escala de calificación

En este punto se establecen la escala de calificación (C) y las características máximas y mínimas de los factores considerados. Una forma de calificación que facilita la diferenciación de los factores, es asignar calificaciones de 1 a 5 sin tomar en cuenta los valores 2 y 4 (escala propuesta por McConnell y Khalil, 1988, y empleada por los autores), aunque existen ocasiones en que el emplear

la escala completa representa una mejor opción. Un ejemplo de ello se observa en la Tabla 21.

**Tabla 21. Escala de calificación de atributos**

DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN (Ci)
Atributo no disponible	0
Calificación mínima (pobre en este atributo)	1
Calificación media (atributo promedio)	3
Calificación máxima (excelente en este atributo)	5

FUENTE: IMP y PEMEX Refinación [22].

En el trabajo referenciado se recomiendan los siguientes criterios para definir las calificaciones máxima y mínima:

- Usar como calificación máxima la mejor opción de las alternativas tecnológicas
- Usar como calificación mínima lo mínimo esperado, por ejemplo: la tasa interna de retorno (TIR)
- En algunos factores técnicos de proceso se puede usar el denominado *techo tecnológico*, es decir, el máximo valor reportado en la literatura especializada.
- Para algunos factores a máxima calificación puede ser establecida tomando en cuenta los servicios esperados, como por ejemplo: contenido del paquete de diseño de proceso (o paquete de ingeniería básica), garantías, etc.

**j. Calificación de los factores**

**k. Generación de la matriz de resultados**

En esta matriz se presentan los resultados de la evaluación, y se realizan los cálculos pertinentes para obtener la evaluación total de cada alternativa. Los cálculos a realizar se pueden representar con la siguiente ecuación:

$$(Calificación\ total\ de\ tecnología)_I = \sum_{k=1}^{nA} Pk \left( \sum_{j=1}^{nSAK} \left( Wj \sum_{i=1}^{nFj} vi * Ci \right) \right) \quad (5)$$

en donde:

- $Pk$  = Porcentaje del aspecto  $k$
- $nA$  = Número de aspectos considerados

$nSA_k$  = Número de subaspectos considerados para cada aspecto  $k$

$nF_j$  = Número de factores considerados para cada subaspecto  $j$

$W_j$  = Fracción del subaspecto  $j$

$v_i$  = Fracción del factor  $i$

$C_i$  = Calificación del factor  $i$

Un formato típico de una matriz es el que se presenta en la Tabla 22, en el cual se presentan, con el detalle que se desee, los aspectos, subaspectos y factores que hayan sido considerados dentro del proceso de evaluación.

**Tabla 22. Matriz de evaluación final de alternativas tecnológicas**

ASPECTO	PUNTAJE MÁXIMO	TECNO. 1	TECNO. 2	TECNO. $n$
<b>1. EVALUACIÓN TÉCNICA</b>				
1.1 Concordancia del proceso con las bases de diseño				
1.2 Características relevantes del proceso				
1.3 Actualización del proceso				
1.4 Flexibilidad del proceso				
1.5 Consumo de materias primas				
1.6 Consumo de químicos y catalizadores				
1.7 Consumo de servicios auxiliares				
1.n Etc.				
<b>2. EVALUACIÓN DE ASPECTOS TÉCNICO COMPLEMENTARIOS</b>				
2.1 Experiencia técnico-administrativa				
2.2 Experiencia general				
2.3 Información técnica				
2.4 Etc.				
<b>3. EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA</b>				
3.1 Tasa interna de retorno				
<b>4. EVALUACIÓN CONTRACTUAL</b>				
4.1 Licencia y tecnología				
4.2 Garantías				
4.3 Etc.				
<b>5. EVALUACIÓN DE ASPECTOS PLAUSIBLES</b>				
5.1 Generación de empleo				
5.2 Impacto ecológico				
5.3 Etc.				
<b>6. EVALUACIÓN DE ASPECTOS ESTRATÉGICO-TÁCTICOS</b>				
<b>7. EVALUACIÓN DE ASPECTOS NORMATIVOS</b>				

FUENTE: IMP y PEMEX Refinación [22].

## I. Selección de la tecnología

Como paso final en la evaluación de las alternativas tecnológicas, se selecciona la tecnología que obtenga la mayor puntuación, y las dos inmediatas inferiores. Estas deben ser priorizadas de mayor a menor y continuar con el proceso de negociación final.

# CAPÍTULO 5. DESARROLLO DEL CASO DE ESTUDIO

## 5.1 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

El caso de estudio que en este trabajo se desarrolla, se basa en la identificación de la *necesidad* de disminución de los altos índices de escasez y cumplimiento de los planes de recuperación y descontaminación de la cuenca alta del río Chicamocha, ubicada en el departamento de Boyacá - Colombia, y que se presentó con mayor detalle en los capítulos iniciales de este trabajo.

Los principales objetivos del desarrollo de la formulación y evaluación del proyecto caso de estudio son:

- Cumplimiento de las metas de descontaminación de la cuenca alta del río Chicamocha, definidas por la Corporación Autónoma de Boyacá.
- Entregar un caudal aproximado de 197 litros por segundo, con la calidad requerida para poder considerar el agua tratada como reutilizable, de tal forma que se aumente la capacidad de oferta de agua fresca del municipio.
- Disminución de los índices de escasez que presenta la ciudad de Tunja, en el departamento de Boyacá, por medio de la reutilización del agua residual generada en el municipio.
- Reducción en el pago a la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, de las tasas retributivas por vertimientos puntuales, correspondientes al vertimiento de las aguas del alcantarillado de la ciudad al río Chicamocha.
- Reutilización del agua tratada en actividades económicas diferentes a la del consumo humano.

El proceso que se pretende utilizar en el proyecto, consiste en el tratamiento biológico de las aguas residuales que provienen del alcantarillado de la ciudad de Tunja – Boyacá. Las alternativas tecnológicas de proceso con que se disponen para realizar dicho tratamiento biológico son: tratamiento con *lodos activados convencional*, *sequencing batch reactor SBR*, y *aireación extendida*.

A continuación se presenta el desarrollo de los pasos enunciados en el capítulo anterior, para la evaluación de las tres alternativas tecnológicas con que se cuenta.

### 5.1.1 Definición de los aspectos a considerar en la evaluación (Ai)

Tabla 23. Aspectos considerados en la evaluación de las alternativas

ASPECTO (Ai)	DECISIÓN
1. Evaluación técnica del proceso	SI
2. Evaluación de aspectos técnicos complementarios	SI
3. Evaluación económico-financiera	SI
4. Evaluación contractual	NO
5. Evaluación de aspectos plausibles	NO
6. Evaluación de aspectos estratégico-tácticos	SI
7. Evaluación de aspectos normativos	NO

Los aspectos contractuales (ver Tabla 23) no fueron considerados por tratarse de un ejemplo en el que no existen oferentes de tecnologías, a los cuales se les haya entregado con anterioridad unas *bases de concurso* o *licitación*, y con los cuales se celebraría posterior a la evaluación de alternativas, una negociación y un contrato.

Entre tanto, los aspectos plausibles aunque son de gran importancia en esta clase de proyectos de carácter social y ambiental, no fueron considerados en la evaluación ya que se partió de la base de que las tres tecnologías de tratamiento biológico contribuyen de la misma manera a: la generación de actividades económicas, al cumplimiento de las políticas ambientales y planes de desarrollo nacional, a la generación directa e indirecta de empleos, beneficios sociales (salud y distribución del ingreso) y mitigación de la escasez de agua fresca en la región.

El efecto discriminante de los aspectos normativos se incluye en los criterios o *filtros* restrictivos de cumplimiento del porcentaje de remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos, marcados en la Norma de Vertimientos para Descargas Orgánicas de Colombia.

### 5.1.2 Identificación de los subaspectos o factores restrictivos

En los casos más generales estos filtros se incluyen en las bases de licitación del caso real que se le entregan a los tecnólogos. De un análisis de los subaspectos y factores que conforman un aspecto, se seleccionaron los siguientes criterios restrictivos o filtros para este caso en particular, los cuales se presentan en la Tabla 23.

**Tabla 24. Subfactores o filtros restrictivos considerados para la evaluación**

FILTRO	VALOR
Remoción de Sólidos Suspendidos mínima	80%
Remoción de DBO	80%
Tecnología plenamente probada	CUMPLE?
Tecnología disponible en el país	CUMPLE?

Otros aspectos importantes que se deben tener en cuenta como criterios restrictivos en un caso real, son el *“Alcance del paquete de ingeniería básica y servicios adicionales”* (asistencia en el arranque, capacitación, etc.). De acuerdo a la información recopilada de la bibliografía abierta, las tres tecnologías cumplen con los filtros impuestos, por lo que todas pasan a la siguiente etapa de evaluación. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 25. Cumplimiento de las alternativas con los criterios restrictivos o filtros**

FILTRO	Lodos Activados Convencional	Sequencing Batch Reactor	Aireación Extendida
Remoción de Sólidos Suspendidos mínima	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Remoción de DBO	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Tecnología plenamente probada	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Tecnología disponible en el país	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

### 5.1.3 Decisión del tipo de evaluación

Debido fundamentalmente a que la información con que se cuenta es la que se encuentra en la bibliografía abierta, no se cuenta con las bases suficientes para estructurar adecuadamente los estados financieros proforma correspondientes al proyecto, se seleccionó la técnica matricial de evaluación.

Como ejemplo de la carencia de información para establecer el estado económico-financiero de estas tecnologías, se puede citar la falta de datos relacionados con: cantidad y costos de equipo auxiliar de proceso, consumos de servicios (energía eléctrica, aire de proceso, etc.), necesidades de entrenamiento de personal, necesidades de mantenimiento, requerimientos especiales para montaje y puesta en marcha, entre otros. De acuerdo a la metodología se pasa a la asignación del peso o puntaje de los aspectos.

### 5.1.4 Desarrollo de la técnica matricial de evaluación

Se optó por la utilización de esta técnica cualitativa tomando en cuenta la clase de información con la que se contaba de las alternativas tecnológicas. En este paso se procede a asignar el peso o puntaje a cada uno de los aspectos considerados ( $P_i$ ), en donde:

$$100 = \sum P_i \quad (6)$$

El peso asignado a cada aspecto considerado para la evaluación se presentan a continuación en la Tabla 26.

**Tabla 26. Peso asignado a cada aspecto considerado**

ASPECTO	PESO ó PUNTAJE (%)
Aspectos técnicos del proceso	25%
Aspectos técnicos complementarios	20%
Aspectos económico-financieros	30%
Aspectos estratégico-tácticos	25%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>

### 5.1.5 Selección de los subaspectos y factores para cada aspecto

Del análisis de subaspectos y factores que conforman un aspecto se seleccionaron los siguientes (no se hace diferenciación entre subaspecto y factor en este caso):

**Tabla 27. Subaspectos y/o factores considerados para cada aspecto**

ASPECTO	SUBASPECTOS Y/O FACTORES
1. Aspectos técnicos del proceso (operación)	1.1 Intervalo de carga orgánica 1.2 Porcentaje de remoción de DBO 1.3 Agentes químicos 1.4 Producción de lodos 1.5 Generación de olores 1.6 Grado de capacitación de operarios 1.7 Variabilidad de caudal 1.8 Variabilidad de calidad del agua 1.9 Tiempos de residencia

ASPECTO	SUBASPECTOS Y/O FACTORES
2. Aspectos técnicos complementarios (flexibilidad)	2.1 Campo de aplicación 2.2 Automatización 2.3 Sensibilidad a interrupciones 2.4 Inclusión de otros procesos
3. Aspectos económico-financieros	3.1 Inversión 3.2 Costos de operación 3.3 Costos de mantenimiento 3.4 Requerimientos de energía 3.5 Plantilla laboral de operación
4. Aspectos estratégico-tácticos (mantenimiento y necesidades)	4.1 Área superficial 4.2 Obra civil 4.3 Reparación <i>in situ</i> 4.4 Disponibilidad de refacciones

### 5.1.6 Asignación de los puntajes o pesos para los subaspectos y/o factores de cada aspecto

La asignación de los puntajes en porcentaje de los subaspectos o factores (en este caso son lo mismo), se realizó bajo la base de que:

$$1 = \sum W_i \quad (\text{para los subaspectos y/o factores}) \quad (7)$$

Los resultados de esta asignación se muestran en la Tabla 28 que a continuación se presenta.

**Tabla 28. Pesos asignados a los subaspectos y/o factores para cada aspecto utilizado**

ASPECTOS	SUBASPECTOS Y/O FACTORES	PESO (fracción)
1. Aspectos técnicos del proceso (operación)	1.1 Intervalo de carga orgánica	0.20
	1.2 Porcentaje de remoción de DBO	0.20
	1.3 Agentes químicos	0.05
	1.4 Producción de lodos	0.10
	1.5 Generación de olores	0.05
	1.6 Grado de capacitación de operarios	0.05
	1.7 Variabilidad de caudal	0.13
	1.8 Variabilidad de calidad del agua	0.15
	1.9 Tiempos de residencia	0.07
<b>SUMA :</b>		<b>1.00</b>
2. Aspectos técnicos complementarios (flexibilidad)	2.1 Campo de aplicación	0.15
	2.2 Automatización	0.30
	2.3 Sensibilidad a interrupciones	0.30
	2.4 Inclusión de otros procesos	0.25
<b>SUMA :</b>		<b>1.00</b>

ASPECTOS	SUBASPECTOS Y/O FACTORES	PESO (fracción)
3. Aspectos económico-financieros	3.1 Inversión	0.30
	3.2 Costos de operación	0.20
	3.3 Costos de mantenimiento	0.15
	3.4 Requerimientos de energía	0.25
	3.5 Plantilla laboral de operación	0.10
<b>SUMA :</b>		<b>1.00</b>
4. Aspectos estratégico-tácticos (mantenimiento y necesidades)	4.1 Área superficial	0.15
	4.2 Obra civil	0.25
	4.3 Reparación <i>in situ</i>	0.25
	4.4 Disponibilidad de refacciones	0.35
<b>SUMA :</b>		<b>1.00</b>

### 5.1.7 Asignación de la escala de calificación

Se acordó emplear una escala para calificar los atributos de los factores, la cual consiste en un rango del 1 al 5, en donde no se toman en cuenta los valores 2 y 4, para facilitar la discriminación.

Tabla 29. Determinación de la escala de calificación

DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN (Ci)
Atributo No disponible	0
Calificación mínima (Atributo pobre o bajo)	1
Calificación media (Atributo promedio)	3
Calificación máxima (Atributo muy bueno o alto)	5

### 5.1.8 Calificación de los factores considerados usando la escala descrita

En el Anexo 6 se presentan los fundamentos para la evaluación de los factores considerados.

### 5.1.9 Generación de la matriz de resultados de la evaluación

Tabla 30. Matriz de resultados de la aplicación de la evaluación de las alternativas tecnológicas

CRITERIO	PESO fracción	Máximo de puntos	LODOS ACTIVADOS		SEQ. BATCH REACTOR		AIREACIÓN EXTENDIDA	
			Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje
<b>1. TÉCNICOS DE PROCESO</b>	<b>25</b>							
1.1 Intervalo de carga orgánica	0.20	25.00	5	25	5	25	5	25
1.2 Porcentaje de remoción de DBO	0.20	25.00	3	15	3	15	5	25
1.3 Agentes químicos	0.05	6.25	5	6.25	5	6.25	5	6.25

CRITERIO	PESO fracción	Máximo de puntos	LODOS ACTIVADOS		SEQ. BATCH REACTOR		AIREACIÓN EXTENDIDA	
			Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje
1.4 Producción de lodos	0.10	12.50	1	2.5	3	7.5	5	12.5
1.5 Generación de olores	0.05	6.25	1	1.25	3	3.75	5	6.25
1.6 Grado de capacitación de operarios	0.05	6.25	5	6.25	1	1.25	5	6.25
1.7 Variabilidad de caudal	0.13	16.25	1	3.25	3	9.75	5	16.25
1.8 Variabilidad de calidad del agua	0.15	18.75	1	3.75	5	18.75	3	11.25
1.9 Tiempos de residencia	0.07	8.75	3	5.25	5	8.75	1	1.75
<b>Subtotal</b>	<b>1</b>	<b>125.00</b>		<b>68.5</b>		<b>96</b>		<b>110.5</b>
<b>2. TÉCNICOS COMPLEMENTARIOS</b>	<b>20</b>							
2.1 Campo de aplicación	0.15	15	3	9	5	15	5	15
2.2 Automatización	0.30	30	5	30	1	6	3	18
2.3 Sensibilidad a interrupciones	0.30	30	3	18	3	18	3	18
2.4 Inclusión de otros procesos	0.25	25	1	5	5	25	3	15
<b>Subtotal</b>	<b>1</b>	<b>100.00</b>		<b>62</b>		<b>64</b>		<b>66</b>
<b>3. ECONÓMICO-FINANCIEROS</b>	<b>30</b>							
3.1 Inversión	0.30	45	3	27	1	9	5	45
3.2 Costos de operación	0.20	30	3	18	5	30	3	18
3.3 Costos de mantenimiento	0.15	22.5	3	13.5	3	13.5	1	4.5
3.4 Requerimientos de energía	0.25	37.5	3	22.5	1	7.5	3	22.5
3.5 Plantilla laboral de operación	0.10	15	5	15	5	15	3	9
<b>Subtotal</b>	<b>1</b>	<b>150.00</b>		<b>96</b>		<b>75</b>		<b>99</b>
<b>4. ESTRATÉGICO-TÁCTICOS</b>	<b>25</b>							
4.1 Área superficial	0.15	18.75	3	11.25	3	11.25	1	3.75
4.2 Obra civil	0.25	31.25	5	31.25	1	6.25	3	18.75
4.3 Reparación <i>in situ</i>	0.25	31.25	5	31.25	5	31.25	5	31.25
4.4 Disponibilidad de refacciones	0.35	43.75	3	26.25	3	26.25	3	26.25
<b>Subtotal</b>	<b>1</b>	<b>125.00</b>		<b>100</b>		<b>75</b>		<b>80</b>
	<b>100</b>							
<b>TOTAL</b>		<b>500.00</b>		<b>326.5</b>		<b>310</b>		<b>355.5</b>

Estos cálculos pueden ser representados con la siguiente ecuación:

$$(Calificación\ total\ de\ tecnología)_I = \sum_{k=1}^{nA} Pk \left( \sum_{i=1}^{nS/f} Wi * Ci \right) \quad (8)$$

en donde:

$Pk$  = Porcentaje del aspecto  $k$

$nA$  = Número de aspectos considerados

$nS/f$  = Número de subaspectos/factores considerados para cada aspecto  $k$

$nFj$  = Número de factores considerados para cada subaspecto  $j$

$W_j$  = Fracción del subaspecto/factor  $i$

$C_i$  = Calificación del subaspecto/factor  $i$

### 5.1.10 Selección de la tecnología

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 30 se recomienda la utilización del proceso de lodos activados de aireación extendida.

## 5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO EMPLEANDO LA ALTERNATIVA TECNOLÓGICA SELECCIONADA

### 5.2.1 Características del agua residual objeto de tratamiento

En el marco del Plan de Aprovechamiento Sostenible de la cuenca del río Chicamocha, la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, encargó a la Universidad de Antioquia en Colombia la ejecución de un estudio acerca del estado de la calidad del recurso hídrico superficial de la cuenca alta, estudio enfocado primordialmente a la recopilación y evaluación de la información disponible, y a la simulación matemática de la situación actual de calidad del agua y escenarios de intervención en el río Chicamocha.

En este estudio se realizó un análisis estadístico del campo de caudales para las diferentes estaciones de monitoreo. Dicha información se resume en la Tabla 31.

**Tabla 31. Distribución de caudales y concentraciones de DBO<sub>5</sub> en la cuenca alta del río Chicamocha**

ESTACIÓN	DIST (km)	CAUDALES (m <sup>3</sup> /s)					CAUDAL HISTÓRICO (m <sup>3</sup> /s)		CONCENTRACIONES DBO <sub>5</sub> (mg/L)				
		prom	max	min	inv	ver	inv	ver	prom	max	min	inv	ver
La arboleda	4.9	0.62	1.83	0.23	0.59	0.54	0.89	0.32	104.6	270	18	165	91.7
Playa arriba	16.1	0.25	0.74	0.04	0.34	0.19	1.34	0.33	23.1	46.5	6	20.2	22.9
Playa abajo	24.7	0.49	1.41	0.22	0.55	0.37	1.8	0.45	11.4	44	1.8	3.5	13.7
La Reforma	44.5	3.48	9.37	1.07	6.58	2.13	6.62	2.91	2.9	6	0.6	3.3	2.5
Termopaipa	52.7	4.22	6.94	2.64	6.76	3.21	5.84	1.38	2.9	6.9	0.5	2.1	3.2
La Liberia	56.9	3.97	9.64	0.22	7.12	2.47	6.74	1.56	5.1	9	1.5	4.5	4.8
San Rafael	74	6.05	12.9	2.65	11.3	4.12	10.3	2.41	3.1	7.2	1.2	3.2	3
Pte. Chámeza	94.7	8.4	21.2	4.15	13.4	5.85	17.6	2.44	20.7	61.5	0.6	6	26.3
Vado Castro	100.6	8.3	20	4.6	13.4	6.4	18.1	2.36	29.2	102	6	36	30.3

FUENTE: Corporación Autónoma Regional de Boyacá [7].

La estación de monitoreo asociada a la ciudad de Tunja es la de La Arboleda, por lo que a partir de los datos de características del agua para esta estación, se estimó las

características para el agua negra que se genera en la ciudad y que es arrojada al río. Para esta estimación se supuso que el río aguas arriba de la ciudad, presenta una concentración de materia orgánica que se puede despreciar para efectos del estimado.

Para este cálculo se supuso además que la población cubierta en el 2004 por el servicio de alcantarillado, correspondía a cerca de 93,200 habitantes, y un caudal de retorno de 160 L/h\*d. Este cálculo arroja un caudal de aguas residuales cercano a los 175 L/s. Para la estimación de la concentración de dichas aguas negras se empleó como patrón los datos de concentración de DBO<sub>5</sub> y de flujo del río, registrados en la estación La Arboleda y el dato de caudal de aguas negras generado por la población de Tunja. La relación es la siguiente:

$$C_2 = \frac{M_1 * C_1}{M_2} \quad (9)$$

En donde

$C_2$  representa la concentración desconocida del parámetro en el agua residual.

$C_1$  representa la concentración del parámetro conocido en el río.

$M_1$  representa el flujo volumétrico del río aguas abajo. Se tomó el valor promedio de caudal mostrado en la Tabla 31, equivalente a 0.62 m<sup>3</sup>/s.

$M_2$  representa el flujo volumétrico del agua residual descargada por el alcantarillado.

Las concentraciones de los parámetros registrados por la estación de monitoreo se presentan en la cuarta columna de la Tabla 32. El desarrollo de la ecuación para los parámetros de DBO<sub>5</sub>, fósforo total, y nitrógeno en las formas Norg y NH<sub>3</sub>, se presentan en la quinta columna de la Tabla 32. La concentración de sólidos en suspensión se tomó dentro del rango típico de concentración para aguas residuales municipales reportadas en la literatura, por considerarse que no era conveniente aplicar la relación del balance de masa, ya que no se poseía la información de la concentración de sólidos aguas arriba, y por ser un parámetro que puede ser afectado en mayor medida por factores propios de la naturaleza diferentes a los de la actividad humana. Los demás

factores no se tuvieron en cuenta para el diseño de la planta, por no representar parámetros de relevancia en ésta clase de estudio.

**Tabla 32. Estimación de las concentraciones de parámetros del agua negra de la ciudad de Tunja**

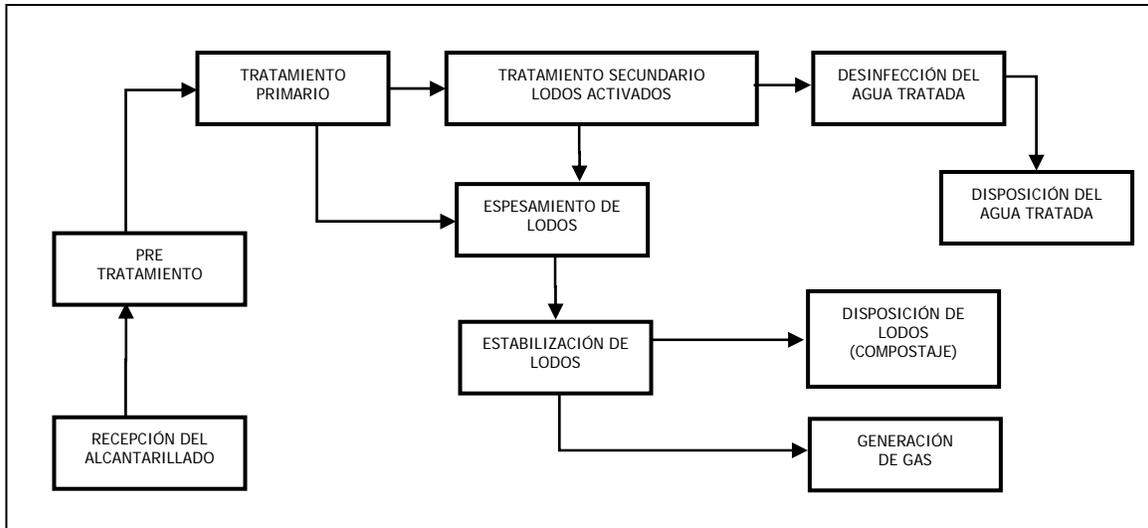
No	PARÁMETRO DE CALIDAD DEL AGUA	UNIDAD	ESTACIÓN DE MEDICIÓN LA ARBOLEDA <sup>a</sup>	ESTIMADO EN LA BOCA DE TUBO DEL ALCANTARILLADO
1	DBO <sub>5</sub>	mg/L	104.59	385
2	Norg	mg/L	4.1	4.1
3	NH <sub>3</sub>	mg/L	21.6	21.6
4	P total	mg/L	3.4	12.3
5	SST	mg/L	284.22	528
6	Coliformes totales	NMP/100 mL	3.50E+05	3.50E+05
7	Temperatura	°C	16.6	16.6

<sup>a</sup> Corporación Autónoma Regional de Boyacá [7].

## 5.2.2 Descripción del proceso de tratamiento empleado

El diseño de este proceso se fundamenta en la alternativa tecnológica que resultó favorecida bajo los criterios considerados en la evaluación realizada al inicio del capítulo. La planta de tratamiento de aguas residuales constará de una sección de pretratamiento de la corriente que sirve como alimentación a la planta, en donde se retiran sólidos gruesos y se eliminan arenas; esta etapa es seguida por una sección de tratamiento primario, que retira parte de la materia suspendida por sedimentación.

La siguiente etapa consta de un tratamiento secundario, el cual trata biológicamente el agua para retirar gran parte de la materia orgánica. Los lodos generados en este proceso se tratan en una etapa anaerobia para estabilizarlos y posteriormente deshidratarlos, para terminar en su disposición. El efluente líquido de la etapa secundaria se pasa a través de filtros (en caso de ser necesario), que remueven el material suspendido remanente en la corriente producida. Finalmente, esta corriente pasa por una unidad de desinfección con cloro, para poder de esta manera entregar un efluente que cumple con las características ambientales requeridas. A continuación se muestra el diagrama conceptual de la planta de tratamiento en la ilustración 9, y del cual se hace una descripción de cada etapa, junto con alguna información de diseño de para los equipos.



**Ilustración 9. Diagrama conceptual del tratamiento del agua residual municipal para la ciudad de Tunja, Colombia.**

### 5.2.2.1 Sistema de pretratamiento

El proceso cuenta con un sistema de rejillas, que reducen la cantidad de sólidos en suspensión de tamaños distintos que arrastra el agua a tratar. Las cantidades esperadas de residuos gruesos en la planta de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico reportadas como típicas, se presentan en la Tabla 33.

**Tabla 33. Información usual sobre las características y cantidades de residuos del tamizado grueso removidos con ayuda de rejillas**

ESPACIAMIENTO ENTRE LAS BARRAS <i>cm</i>	CONTENIDO DE HUMEDAD %	PESO ESPECÍFICO <i>kg/m<sup>3</sup></i>	VOLUMEN DE RESIDUOS DEL TAMIZADO <i>m<sup>3</sup>/MMm<sup>3 a</sup></i>	
			Intervalo	Valor usual
1.8	60 – 90	641 – 1090	37.4 – 75	52
2.5	50 – 80	641 – 1090	15.0 – 37.4	22.5
3.8	50 – 80	641 – 1090	7.5 – 15.0	11.2
5.0	50 – 80	641 – 1090	3.8 – 11.2	5.6

FUENTE: *Crites & Tchobanoglous*. [8].

<sup>a</sup> Metros cúbicos por millón de metros cúbicos.

El agua negra, una vez libre de sólidos gruesos pasa a un cárcamo de bombeo, el cual estabiliza el flujo que se envía a un sistema de desarenado y cribado fino, en donde se retienen pequeños trozos de tela, papel, grasas, natas, materiales plásticos de diferente clase, arenas, heces, residuos de comida, etc. Información usual sobre los residuos generados en el tamizado se presentan en la Tabla 34.

### 5.2.2.2 Tratamiento primario

Después del *pretratamiento*, el agua residual se envía a una etapa de *tratamiento primario*, consistente en una sedimentación en la cual se separan las partículas más pesadas que el agua. Basándose en la diferencia de pesos específicos entre las partículas sólidas y la fase líquida en la que se encuentran, la sedimentación elimina principalmente arena, materia particulada y los flóculos que se forman cuando existe coagulación química.

### 5.2.2.3 Tratamiento biológico

Posteriormente, el efluente del sedimentador primario es enviado a un tratamiento biológico, consistente en un sistema de lodos activados de aireación extendida. El principal objetivo de los tratamientos biológicos del agua residual es la estabilización de la materia orgánica[25].

**Tabla 34. Información usual sobre las características y cantidades de residuos generados en el tamizado de agua residual con rejillas finas y tamices de plato perforado**

OPERACIÓN	ABERTURA <i>cm</i>	CONTENIDO DE HUMEDAD %	PESO ESPECÍFICO <i>kg/m<sup>3</sup></i>	VOLUMEN DE RESIDUO <i>m<sup>3</sup>/MMm<sup>3</sup><sup>b</sup></i>	
				Intervalo	Valor usual
Tamiz de rejillas finas	1.27	80 – 90	641 – 962	45 – 112	75
Plato perforado <sup>a</sup>	0.64	80 – 90	641 – 962	30 – 60	45
Tambor rotatorio <sup>a</sup>	0.64	80 – 90	641 – 962	30 – 60	45

FUENTE: *Crites R. & Tchobanoglous G.* [8].

<sup>a</sup> Ubicados a continuación del tamizado grueso.

<sup>b</sup> Millones de metros cúbicos.

Este proceso se basa en la capacidad natural de los microorganismos para degradar la materia orgánica contaminante en subproductos inocuos, y en algunos casos aprovechables. El tipo de metabolismo de los organismos permite clasificar en general los procesos en aerobios y anaerobios. En los primeros, los microorganismos necesitan de oxígeno disuelto para vivir, mientras que en el segundo los organismos viven en ausencia obligada de oxígeno. Existe un estado intermedio conocido como *anóxico*, en el cual no existe presencia de oxígeno disuelto, pero con la presencia de aceptores de electrones. En este proceso el nitrógeno en su forma de nitratos se convierte

biológicamente en su forma gaseosa. Los procesos en los que intervienen microorganismos indiferentes a la presencia de oxígeno se conocen como facultativos.

Estos procesos se subdividen a su vez, dependiendo si el proceso se lleva a cabo en sistemas de cultivo en suspensión, de cultivo fijo o combinación de los mismos. Las principales aplicaciones[25] de estos procesos son: (a) la eliminación de la materia orgánica carbonosa<sup>20</sup>, (b) la nitrificación, (c) la desnitrificación y (d) la estabilización. En la Tabla 35 se observa las subdivisiones de los procesos aerobio y anaerobio.

El tanque reactor cuenta con equipos de aireación, que incorporan el oxígeno al agua a través de pequeñas burbujas, promoviendo la circulación continua del agua, lo cual evita la decantación de los sólidos y aumenta la degradación de la materia orgánica que realizan los microorganismos presentes.

**Tabla 35. Subdivisiones de los procesos biológicos aerobio y anaerobio**

	<b>CULTIVO FIJO</b>	<b>CULTIVO EN SUSPENSIÓN</b>
<b>TRATAMIENTO AEROBIO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtros percoladores</li> <li>• Filtros de pretratamiento</li> <li>• Sistemas rotativos o biodiscos</li> <li>• Reactores de lecho empacado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lodos activados</li> <li>• Nitrificación</li> <li>• Lagunas aireadas</li> <li>• Digestión aerobia</li> <li>• Estanques de estabilización</li> </ul>
<b>TRATAMIENTO ANAEROBIO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtro anaerobio</li> <li>• Estanques anaerobios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digestión anaerobia</li> <li>• Proceso anaerobio de contacto</li> </ul>

FUENTE: *Metcalf & Eddy* [25].

Una vez el agua residual ha estado el tiempo suficiente en contacto con los microorganismos, es enviada a un sistema de clarificación que separa por sedimentación los sólidos generados en el tratamiento biológico.

El efluente del sistema de sedimentación secundaria es enviado a la etapa de desinfección. Una porción de los lodos que se sedimentan son recirculados al reactor de aireación, mientras que la otra porción se envía a una sección de espesamiento de lodos.

Los procesos biológicos son los que determinan la diferencia en la calidad del agua tratada y en la producción de efluentes secundarios. En la tabla 8 del Anexo 6 se

<sup>20</sup> Generalmente medida como DBO, COT ó DQO.

presentan algunas ventajas, desventajas y características particulares de las alternativas que se evaluaron.

#### **5.2.2.4 Estabilización de los lodos**

Los lodos espesados, junto con los lodos que se sedimentaron en el tratamiento primario y los provenientes del cribado fino son enviados a un sistema de estabilización de lodos, en el que se aplica a los lodos un tratamiento de digestión anaerobia. Los lodos ya digeridos son enviados a un sistema de deshidratación para su posterior disposición.

### **5.3 DIMENSIONAMIENTO DE LAS UNIDADES DE TRATAMIENTO**

El método que aquí se empleó para el diseño del sistema y predimensionamiento de las unidades de proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, fue desarrollado originalmente por *Lawrence y McCarty*[31]. Este método, que ha sido modificado con el paso del tiempo, es el más ampliamente empleado por las firmas de consultoría[51]. Incluso, los principios que plantea dicho método son los utilizados actualmente por la *International Water Association IWA* (anteriormente la *International Association on Water Pollution, Research and Control IAWPRC*) en sus métodos computarizados de cálculo y diseño. Las ecuaciones básicas de diseño de Lawrence y McCarty se encuentran con mayor detalle en *Lawrence & McCarty*[31], *Metcalf & Eddy*[25] y *Grady & Lim*[19]. Los criterios de diseño que se aplicaron fueron los descritos por diferentes autores, incluyendo los sugeridos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, que rige en Colombia.

Las características tanto del agua residual de entrada como las del efluente tratado en la planta de tratamiento se presentan en las tablas 1 y 2 del Anexo 2, y se emplearon en el dimensionamiento preliminar de los equipos.

Como parte del dimensionamiento de las unidades de tratamiento, se encuentra el cálculo de las dimensiones y datos de diseño principales de un tanque de aireación para el tratamiento de lodos activados, con sus correspondientes unidades de pretratamiento (desarenador y sedimentador primario) y equipos posteriores como un sedimentador

secundario, espesador de lodos, reactor anaerobio para la estabilización de lodos. A continuación se presentan los criterios de diseño y los cálculos del diseño para cada una de estas unidades de tratamiento. La simbología de las memorias de cálculo se encuentran en el Anexo 7.

### 5.3.1 Desarenador de flujo horizontal

Los criterios empleados en el predimensionamiento de la unidad de desarenado se presentan en la Tabla 36, mientras que la memoria de cálculo se presenta en la Tabla 38.

**Tabla 36. Criterios de diseño para el desarenador**

CRITERIO	VALOR
Velocidad de sedimentación, <i>m/h</i>	55
Tiempo de detención, <i>min</i>	2 <sup>a</sup>
Remoción de SS, %	10
Remoción de DBO <sub>5</sub> , %	3
Relación de remoción de arenas, $m^3/10^3 m^3$	0.035 <sup>b</sup>
Relación ancho : profundo	1.25 a 1
Relación largo : ancho	2.5 a 1
Profundidad mínima, <i>m</i>	2 <sup>c</sup>
Factor de sobrediseño para el volumen, %	20

FUENTE: *Metcalf & Eddy* [25] y *RAS 2,000* [27].

<sup>a</sup> Water Environment Federation (WEF) & American Society of Civil Engineers (ASCE) [51], rango de 15 a 90 sec.

<sup>b</sup> Water Pollution Control Federation [53] y EPA [15], rango de 0.004 a 0.037  $m^3/1000 m^3$

<sup>c</sup> WEF [51] y ASCE [53], profundidad del agua de 0.6 a 1.5 m (dependiendo del área del cana y velocidad de flujo).

### 5.3.2 Sedimentador primario

Los criterios que se emplearon para el predimensionamiento de la unidad de sedimentación primaria se presentan en la Tabla 37, al igual que la memoria de cálculo en la Tabla 39.

En esta unidad de tratamiento primario se lleva a cabo la sedimentación (al igual que en el desarenador), que constituye una de las operaciones principales del tratamiento del agua residual. La sedimentación es un proceso en el cual se separan las partículas más pesadas que el agua; se basa en la diferencia de pesos específicos entre las partículas sólidas y la fase líquida en la que se encuentran.

**Tabla 37. Criterios de diseño para el sedimentador primario**

CRITERIO	VALOR
Tasa de desbordamiento superficial, $m^3/m^2*d$	40 <sup>a, b, c, d, e</sup>
Remoción de DBO <sub>5</sub> , %	33
Remoción de SS, %	70
Concentración de sólidos en el fango, %	6
Peso específico del fango primario	1.03 <sup>f</sup>
Profundidad, $m$	4 <sup>a, b, c, d, e</sup>
Diámetro, $m$	3 - 60
Factor de sobrediseño para el volumen, %	20

FUENTE: *Metcalf & Eddy* [25] y *RAS 2,000* [27].

<sup>a</sup> Metcalf & Eddy [26], rango de 32 a 48  $m^3/m^2*d$ , profundidad para clarificadores circulares 3 a 5 m.

<sup>b</sup> Naval Facilities Design Manual [49], 49  $m^3/m^2*d$  a flujo máximo, profundidad del agua 3 m.

<sup>c</sup> EPA Process Design Manual Solids [17], 33 a 49  $m^3/m^2*d$  para flujo promedio, prof. del agua 4 a 5 m.

<sup>d</sup> U.S. Army [48], desde 12  $m^3/m^2*d$  sin exceder 38  $m^3/m^2*d$  para flujo de diseño, profundidad de 2.5 a 4.5 m.

<sup>e</sup> Steel & McGhee [38], 24 a 60  $m^3/m^2*d$  y profundidad del agua 1 a 5 m.

<sup>f</sup> EPA Process Design Manual Sludge [16], valor típico 1.02.

**Tabla 38. Memoria de cálculo del desarenador.**

MEMORIA DE CÁLCULO DESARENADOR		
DATOS INICIALES		
ITEM	VARIABLE	ECUACIONES Y RESULTADOS
1.	Cálculo el área de la sección horizontal	$Q = 0.197 m^3/s$ $V_s = 55 m/s$ $Q = (0.197 m^3/s) * (86400 s/d) = 17016 m^3/d$ $V_s = (55 m/s) * (24 h/d) = 1320 m/d$ $A = \frac{Q}{V_s} = \frac{17016}{1320} = 12.89 \cong 13 m^2$
2.	Determinación del volumen del desarenador	$t_r = (120 s) * \left( \frac{1 d}{86400 s} \right) = 13.9 \times 10^{-4} d$ $V = Q * t_r = (17016 m^3/d) * (13.9 \times 10^{-4} d) = 24 m^3$ $V' = (24 m^3) * (1.2) = 29 m^3$
3.	Dimensionamiento del tanque <sup>a</sup>	$h_{min} = 1.85 m \quad Long = 5.2 m \quad Anch = 2.5 m$ $A = 13 m^2 \quad V = 29 m^3$

MEMORIA DE CÁLCULO DESARENADOR		
DATOS INICIALES		
4.	Estimación del volumen de arena producido	$Q_{arena} = \left( \frac{0.035 \text{ m}^3 \text{ arena}}{1000 \text{ m}^3 \text{ agua residual}} \right) * (17016 \text{ m}^3/d)$ $Q_{arena} = 0.6 \text{ m}^3/d \text{ de arena}$
5.	Cálculo de los flujos de DBO <sub>5</sub> y SS en el efluente	$m_e \text{ DBO}_5 = (1 - 0.03) * (6511 \text{ kg/d}) = 6355 \text{ kg/d}$ $m_e \text{ SS} = (1 - 0.1) * (8995 \text{ kg/d}) = 8095 \text{ kg/d}$

<sup>a</sup> WEF [51] y ASCE [53] rango para profundidad de 3 a 25 m (función de la profundidad del canal y la velocidad de sedimentación de las arenas).

**Tabla 39. Memoria de cálculo del sedimentador primario**

MEMORIA DE CÁLCULO SEDIMENTADOR PRIMARIO		
DATOS INICIALES		Caudal de entrada: $17231 \text{ m}^3/d$ Flujo másico de DBO <sub>5</sub> : $6759 \text{ kg/d}$ Flujo másico de SS: $8686 \text{ kg/d}$
ITEM	VARIABLE	ECUACIONES Y RESULTADOS
1.	Cálculo del área de sedimentación	$TDS = 40 \text{ m}^3/\text{m}^2 * d$ $A = \frac{Q}{TDS} = \frac{17231 \text{ m}^3/d}{40 \text{ m}^3/\text{m}^2 * d} = 432 \text{ m}^2$
2.	Estimación del volumen del sedimentador	$V = A * h = (432 \text{ m}^2) * (4 \text{ m}) = 1728 \text{ m}^3$ $V' = (1728) * (1.2) = 2074 \text{ m}^3$
3.	Determinación del tiempo de retención <sup>a, b, c, d, e</sup>	$t_r = \frac{2074 \text{ m}^3}{17231 \text{ m}^3/d} = 0.12 \text{ d} = 2.8 \text{ h}$
4.	Determinación de la geometría del sedimentador	$h = \frac{2074 \text{ m}^3}{432 \text{ m}^2} = 4.8 \text{ m}$ $d = 2 * \sqrt{\frac{432}{3.14}} = 23.5 \text{ m}$
5.	Cálculo de la masa de lodo seco retirado	$m_e \text{ SS} = (0.6) * (8686 \text{ kg/d}) = 5212 \text{ kg/d} \text{ de lodo seco}$
6.	Cálculo del caudal de lodo retirado	$Q_f = \frac{5212}{(0.06) * (1000) * (1.03)} = 84.3 \text{ m}^3/d$

MEMORIA DE CÁLCULO SEDIMENTADOR PRIMARIO		
7.	Determinación de los flujos de SS y DBO <sub>5</sub> en el efluente	$m_e DBO_5 = (1 - 0.35) * (6759 \text{ kg/d}) = 4394 \text{ kg/d}$ $m_e SS = (0.4) * (8686 \text{ kg/d}) = 3474.4 \text{ kg/d}$
8.	Determinación de las concentraciones de SS y DBO <sub>5</sub> en el efluente	$[DBO_5] = \frac{4394 \text{ kg/d}}{17147 \text{ m}^3/\text{d}} = 256 \text{ g/m}^3$ $[SS] = \frac{3474.4 \text{ kg/d}}{17147 \text{ m}^3/\text{d}} = 202 \text{ g/m}^3$

<sup>a</sup> Metcalf & Eddy [26], sedimentador primario seguido de tratamiento secundario de 1.5 a 2.5 horas.

<sup>b</sup> Steel & McGhee [38], de 1 a 2 horas basado en el flujo pico.

<sup>c</sup> Fair *et al* [18], periodo mínimo de detención de 2 horas, con una profundidad del agua de 3 m.

<sup>d</sup> Sunstrom & Klei [39], de 1 a 4 horas.

<sup>e</sup> United States Army [48], 1.5 horas cuando el clarificador precede a un sistema de lodos activados.

### 5.3.3 Reactor de aireación

Para desarrollar el dimensionamiento preliminar del reactor de aireación, se emplearon los criterios de diseño que se presentan en la Tabla 40, mientras que los cálculos se muestran en la Tabla 42.

Tabla 40. Criterios de diseño para el reactor aerobio

CRITERIO	VALOR
Concentración de DBO <sub>5</sub> en el efluente, <i>mg/L</i>	30
Concentración de SS en el efluente, <i>mg/L</i>	30
Fracción biodegradable de los SS en el efluente, %	65
Fracción de DBO <sub>5</sub> de la DBO última, %	68
Tiempo de retención celular $\theta_C$ , <i>d</i>	10
Coeficiente $Y$ , $\frac{\text{mg SSV}}{\text{mg DBO}_5}$	0.6 <sup>a</sup>
Coeficiente $kd$ , $d^{-1}$	0.06 <sup>b</sup>
Fracción volátil de SS en el Licor de Mezcla (SSLM), %	80
Eficiencia de transferencia de O <sub>2</sub> en el equipo de aireación, %	15
Profundidad recomendada, <i>m</i>	5

FUENTE: Metcalf & Eddy [25] y RAS 2,000 [27].

<sup>a</sup> Bisogni & Lawrence [3], rango de 0.4 a 0.8, típico 0.6.

<sup>b</sup> Bisogni & Lawrence [3], rango de 0.004 a 0.075, típico 0.06.

En este proceso de tratamiento biológico con lodos activados, el agua residual tamizada y sedimentada se mezcla con cantidades variables de lodo biológico, proveniente del flujo inferior del clarificador secundario.

Esta mezcla ocurre en el tanque de aireación, en donde los organismos y el agua residual entran en contacto con abundante cantidad de oxígeno. Alrededor de 8 m<sup>3</sup> de

aire se inyectan por cada  $m^3$  de agua residual tratado[9]. En estas condiciones, los microorganismos oxidan parte de la materia orgánica convirtiéndola en dióxido de carbono y agua. La parte restante del contenido orgánico lo sintetizan en forma de nuevas células, extrayendo la energía necesaria de la oxidación. La corriente que se recircula al tanque de aireación proveniente del fondo del sedimentador secundario, y varía en proporciones que van desde el 20 al 100%[8] de la corriente de salida inferior del clarificador. El volumen típico de lodo retornado al tanque de aireación es de 20 a 30% del flujo de agua residual que se alimenta al tanque[9].

### 5.3.4 Clarificador secundario

Los criterios de diseño que se presentan en la Tabla 41, fueron empleados en el predimensionamiento del clarificador secundario.

**Tabla 41. Criterios de diseño para el clarificador secundario**

CRITERIO	VALOR
Tasa de desbordamiento superficial, $m^3/m^2*d$ (m/h)	25 (1.04) <sup>a, b</sup>
Tasa de carga másica, $kg/m^2*d$	120
Relación largo : profundo	10 : 1
Profundidad, $m$	4.5
Factor de sobrediseño para el volumen, %	20

FUENTE: *Metcalf & Eddy* [25] y *RAS 2,000* [27].

<sup>a</sup> Manual of Practice No. 8, WPCF [52], máximo sugerido para velocidad de flujo promedio 1.36 m/h.

<sup>b</sup> WEF & ASCE [51], rango de 0.68 a 1.19 m/h, promedio 0.95 m/h para flujo promedio en sedimentadotes circulares.

**Tabla 42. Memoria de cálculo del reactor de aireación**

MEMORIA DE CÁLCULO REACTOR DE AIREACIÓN	
DATOS INICIALES	Caudal de entrada: $17147 m^3/d$ Flujo másico de $DBO_5$ : $4394 kg/d$ Flujo másico de SS: $3474 kg/d$ Concentración de $DBO_5$ en el afluente: $256 g/m^3$ Concentración de SS en el afluente: $202 g/m^3$ Concentración de SSVLM: $3750 g/m^3$ Concentración de SS en el fango de retorno: $10000 g/m^3$

MEMORIA DE CÁLCULO REACTOR DE AIREACIÓN		
ITEM	VARIABLE	ECUACIONES Y RESULTADOS
1.	Estimación de la concentración de DBO <sub>5</sub> soluble en el efluente	$DBO_{5\text{efluente}} = DBO_{\text{soluble que escapa}} + DBO_{5\text{de los SS en el efluente}}$ <p>a. Determinación de los SS del efluente.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Fracción biodegradable de los sólidos biodegradables del efluente:  <math>(0.65) * (30) = 19.5 \text{ mg/L}</math></li> <li>DBO<sub>L</sub> última de los sólidos biodegradables del efluente:  <math>(14.7) * (1.42) = 27.7 \text{ mg/L}</math></li> <li>DBO<sub>5</sub> de los SS del efluente: <math>(27.7) * (0.68) = 18.83 \text{ mg/L}</math></li> </ul> <p>b. Cálculo de la DBO<sub>5</sub> soluble del agua a tratar que escapa al tratamiento.  <math>30 = S + 18.83 \quad S = 30 - 18.83 = 11.17 \text{ mg/L}</math></p>
2.	Cálculo de la eficiencia	<p>a. Eficiencia basada en la DBO<sub>5</sub> soluble: <math>E_s = \frac{256.2 - 11.17}{256.2} * 100 = 95.6 \%</math></p> <p>b. Eficiencia basada en la operación de la planta:  <math>E_s = \frac{256.2 - 30}{256.2} * 100 = 88.3 \%</math></p>
3.	Cálculo del volumen del reactor y área de aireación	$V_r = \frac{\theta_c * Q * Y * (S_o - S)}{X * (1 + kd * \theta_c)} = \frac{(10) * (17147) * (0.6) * (256.2 - 11.17)}{(4685 * 0.8) * (1 + 0.06 * 10)} = 4204 \text{ m}^3$
4.	Cálculo de la cantidad de fango a purgar diariamente	<p>a. Determinación de la <math>Y_{obs}</math>.</p> $Y_{obs} = \frac{Y}{1 + kd * \theta_c} = \frac{0.6}{1 + 0.06 * 10} = 0.375$ <p>b. Determinación de la masa de lodo activado volátil purgado por medio de la recirculación</p> $P_x = \frac{Y_{obs} * Q * (S_o - S)}{1000} = \frac{(0.375) * (17147) * (256.2 - 11.2)}{1000} = 1575.4 \text{ kg/d}$ <p>c. Determinación de la masa total de fango, con base en los sólidos suspendidos.</p> $P_x = \frac{1575.4}{0.8} = 1970 \text{ kg/d}$
5.	Estimación del fango enviado al espesador desde el reactor	<p>a. Sólidos suspendidos en el efluente:  <math>m_e \text{ SS} = (30) * (17000) = 510 \text{ kg/d}</math></p> <p>b. Masa de sólidos suspendidos generados en el proceso de fangos activados: <math>2122 \text{ kg/d}</math></p> <p>c. Sólidos suspendidos purgados:  <math>m_p \text{ SS} = (1970 - 510) = 1460 \text{ kg/d}</math></p> <p>d. Caudal de fango purgado:  <math>Q_p = \frac{1460 \text{ kg/d}}{10000 \text{ g/m}^3} = 146 \text{ m}^3/\text{d}</math></p>
6.	Estimación de la relación de recirculación mediante un balance de masa respecto al reactor.	<p>a. Sólidos suspendidos volátiles en el aireador X: <math>3750 \text{ mg/L}</math></p> <p>b. Sólidos suspendidos volátiles en el retorno: <math>(10000) * (0.8) = 8000 \text{ mg/L}</math></p> <p>c. Sólidos suspendidos volátiles en el afluente: <math>0 \text{ mg/L}</math></p> $(8000 \text{ mg/L}) * (Q_{\text{recirculacion}}) = (3750 \text{ mg/L}) * (Q_{\text{afluente}} + Q_{\text{recirculacion}})$ $(2.13) * (Q_{\text{recirculacion}}) = (Q_{\text{afluente}} + Q_{\text{recirculacion}})$

MEMORIA DE CÁLCULO REACTOR DE AIREACIÓN		
		$\alpha = \left( \frac{Q_{recirculacion}}{Q_{afluente}} \right) = 0.88$
7.	Cálculo de tiempo de retención hidráulica para el reactor	$\theta_{rh} = \frac{V_r}{Q} = \frac{4204}{17147 \text{ m}^3/d} \times 24 = 6 \text{ h}$
8.	Cálculo del oxígeno necesario, basado en la demanda carbonosa última DBO <sub>L</sub> (sin tomar en cuenta el O <sub>2</sub> necesario para nitrificación).	<p>a. Masa de DBO<sub>L</sub> utilizada: <math display="block">\frac{Q * (S_o - S)}{0.68 * 1000} = \frac{(17147) * (256 - 11)}{0.68 * 1000} = 6178 \text{ kg/d}</math></p> <p><i>Oxígeno utilizado = 6178 kg/d</i></p> <p>b. Cálculo del oxígeno necesario: <math>O_2 \text{ utilizado} - 1.42 * P_x</math></p> <p><math>O_2 \text{ necesario} = 6180 - (1.42 * 1575.4) = 3941 \text{ kg/d}</math></p> <p><math>O_2 \text{ necesario} = 3941 \text{ kg/d}</math></p>
9.	Comprobación de la relación F/M y de la Carga Volumétrica C <sub>v</sub> .	<p>a. Determinación de la relación F/M: <math display="block">\frac{F}{M} = \frac{S_o}{\theta_{rh} * X}</math></p> <p><math display="block">\frac{F}{M} = \frac{256}{(0.245) * (3750)} = 0.278 \text{ d}^{-1}</math></p> <p>b. Determinación de la Carga Volumétrica: <math display="block">C_v = \frac{Q * S_o}{V_r * 1000}</math></p> <p><math display="block">C_v = \frac{(17147) * (256)}{(4204) * 1000} = 1.044 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3 * \text{d}</math></p>
10.	Cálculo del aire necesario para aireación en el reactor	<p>a. Determinación del aire teórico, suponiendo un 23.2% de O<sub>2</sub> puro:</p> <p><math display="block">A_t = \frac{3941 \text{ kg/d}}{(1.201 \text{ kg/m}^3) * (0.232)} = 14145 \text{ m}^3/d</math></p> <p>b. Cálculo del aire necesario real:</p> <p><math display="block">A_r = \frac{14145}{0.15} \text{ m}^3/d = 94,300 \text{ m}^3/d</math></p>

En la unidad de clarificación secundaria, los microorganismos floculantes sedimentan y son extraídos de la corriente efluente. A la corriente que se extrae del fondo del sedimentador, que está conformada por microorganismos, se le conoce con el nombre de lodo activado. Los cálculos se presentan en la Tabla 43.

**Tabla 43. Memoria de cálculo para el clarificador secundario**

MEMORIA DE CÁLCULO CLARIFICADOR SECUNDARIO		
ITEM	VARIABLE	ECUACIONES Y RESULTADOS
1.	Determinación del área de sedimentación necesaria	<p>a. Empleando la Tasa de Desbordamiento superficial TDS.</p> $A = \frac{Q}{TDS} = \frac{17147}{25} = 686 \text{ m}^2$ <p>b. Empleando la Tasa Másica de Carga TMC.</p> $m \text{ SS} = (4685) * (17147) = 80333.4 \text{ kg/d}$ $A = \frac{m \text{ SS}}{TMC} = \frac{80333.4}{120} = 670 \text{ m}^2$ <p>c. Se escoge el área mayor, por lo tanto el área necesaria para la sedimentación es <math>686 \text{ m}^2</math></p>
2.	Cálculo del volumen del sedimentador.	$V = A * h = (686) * (4.5) = 3083 \text{ m}^3$ $V' = (3083) * (1.2) = 3700 \text{ m}^3$
3.	Cálculo del tiempo de retención.	$t_r = \frac{V}{Q} = \frac{3083}{17147} = 0.18 \text{ d} = 4.3 \text{ h}$
4.	Determinación de la geometría <sup>a</sup>	$d = 2 * \sqrt{\frac{686}{3.14}} = 29.6 \text{ m} \cong 30 \text{ m}$

<sup>a</sup> Manual of Practice No. 8, WPCF [52], para un diámetro de tanque entre 30 a 42.7 m, la profundidad mínima del agua es 3.96 m (13 ft) y la sugerida es 4.23 m (14 ft). La profundidad empleada es de 4.5 m.

### 5.3.5 Espesador por gravedad

La fracción de lodo activado que no se recircula al reactor de aireación, se envía al sistema de tratamiento de lodos para estabilización y disposición, el cual hace parte el espesamiento de lodos activados. Los criterios de diseño que se presentan en la Tabla 44, son los que se utilizaron en el dimensionamiento preliminar del espesador de lodos, mientras que la memoria de cálculo de presenta en la Tabla 45.

### 5.3.6 Digestor anaerobio de lodos

La digestión anaerobia es un proceso en el cual se lleva a cabo la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular. Este proceso se realiza en un reactor cerrado, que se puede alimentar con fango en forma continua o intermitente. Los tiempos de detención son variables, y van de 30 a 60 días para el proceso de digestión de baja carga, y de 15 días o menos para reactores de alta carga[25]. Estos reactores

de alta carga pueden manejar concentraciones de DQO desde 1,500 mg/l hasta 10,000 mg/l o mayores[13].

**Tabla 44. Criterios de diseño para el espesador de lodos por gravedad**

CRITERIO	VALOR
Recuperación de SS propuesta, %	85
Tasa de desbordamiento superficial, $m^3/m^2*d$	2 - 4 <sup>a</sup>
Tasa de carga másica, $kg/m^2*d$	10 - 35
Profundidad recomendada, $m$	2 - 5 <sup>b</sup>
Tiempo de retención, $h$	1

FUENTE: *Metcalf & Eddy* [25] y *RAS 2,000* [27].

<sup>a</sup> WEF & ASCE [51], el rango de diseño para la tasa de desbordamiento más apropiada para lodos secundarios es de 4 a 8  $m^3/m^2*d$ .

<sup>b</sup> WEF & ASCE [51], el diseño más común para espesadores por gravedad es el circular, con una profundidad del agua entre 3 y 4 m.

**Tabla 45. Memoria de cálculo del espesador de lodos por gravedad**

MEMORIA DE CÁLCULO ESPESADOR DE LODOS		
DATOS INICIALES		Caudal de entrada: $146 m^3/d$ Flujo másico de SS: $1460 kg/d$
ITEM	VARIABLE	ECUACIONES Y RESULTADOS
1.	Cálculo del área necesaria para espesamiento usando la TDS	$A = \frac{Q}{TDS} = \frac{146}{3} = 49 m^2$
2.	Cálculo del área necesaria para espesamiento usando la TMC	$A = \frac{m SS}{TMC} = \frac{1460}{25} = 59 m^2$ Se escoge el área mayor, por lo tanto el área necesaria para la sedimentación es $59 m^2$ .
3.	Balace de SS en el espesador	a. Flujo másico de SS en el fango espesado: $(1460) * (0.85) = 1241 kg/d$ b. Flujo másico de SS en el efluente: $(1460 - 1241) = 219 kg/d$ c. Estimación de la DBO <sub>5</sub> de los SS en el efluente: $(219) * (0.65) * (0.68) * (1.42) = 139 kg/d$ d. Caudal de lodos: $\frac{1241}{(1.03) * (1000) * (0.04)} = 30 m^3/d$ e. Caudal recirculado: $(146 - 30) = 116 m^3/d$
4.	Cálculo del volumen del espesador	$V = Q * t_r = 146 * \frac{1 d}{24 h} = 6 m^3$ $V' = (6) * (1.2) = 7.3 m^3$

En este proceso, el material orgánico soluble es convertido a ácidos volátiles por medio de la fermentación ácida, y luego es convertido a metano y CO<sub>2</sub>, por medio de la fermentación del metano. El gas que se genera en el reactor contiene entre un 65 – 75% [13] de metano, y puede ser empleado en el calentamiento del reactor. Este proceso genera alrededor de 5 veces menos lodo que el tratamiento aerobio. Además, este lodo no es putrescible y su contenido de organismos patógenos es bajo. Los criterios de diseño utilizados en el predimensionamiento del reactor se muestran en la Tabla 46, mientras que los cálculos se muestran en la Tabla 47.

**Tabla 46. Criterios de diseño para el digestor anaerobio**

CRITERIO	VALOR
Concentración de DBO <sub>5</sub> en el sobrenadante, <i>mg/L</i>	5,000
Concentración de SS en el sobrenadante, <i>mg/L</i>	5,000
Concentración de sólidos en el fango digerido, %	5
Fracción volátil de SS en el LM, %	80
Fracción volátil de SS en el fango primario, %	65
Fracción de destrucción de SV en el digestor, %	50 <sup>a</sup>
Rendimiento de producción de gas, <i>m<sup>3</sup> gas/kg SV destruidos</i>	1.12 <sup>b</sup>
Sólidos en el fango, %	5 <sup>c</sup>
Peso específico del fango	1.02
Temperatura de operación, °C	35 <sup>d</sup>
Tiempo de retención, <i>d</i>	10 <sup>e</sup>

FUENTE: *Metcalf & Eddy* [25] y *RAS 2,000* [27].

<sup>a</sup> La fracción de sólidos volátiles destruidos típica se encuentra entre el 40 a 65% [51].

<sup>b</sup> La tasa de producción de gas usualmente se encuentra entre 0.75 y 1.0 m<sup>3</sup> por kg de sólidos volátiles destruidos [51].

<sup>c</sup> La concentración típica de sólidos en una mezcla de lodos primarios y biológicos espesados para prescindir del uso de un digestor secundario es de 4 a 6% [51].

<sup>d</sup> La mayoría de los sistemas de digestión anaerobia han sido diseñados para operar en un rango de temperatura mesofílica, aproximadamente 35°C [51].

<sup>e</sup> La selección del tiempo mínimo de residencia se basa en la experiencia y las “reglas de dedo”. Para digestores de alta carga suele estar entre 10 y 20 días [51].

**Tabla 47. Memoria de cálculo del digestor anaerobio**

MEMORIA DE CÁLCULO DIGESTOR ANAEROBIO DE LODOS	
DATOS INICIALES	Caudal proveniente del sedimentador primario: $84 \text{ m}^3/d$ Flujo de SS provenientes del sedimentador primario: $5212 \text{ kg}/d$ Caudal proveniente del espesador: $30 \text{ m}^3/d$ Flujo de SS provenientes del espesador: $1240 \text{ kg}/d$

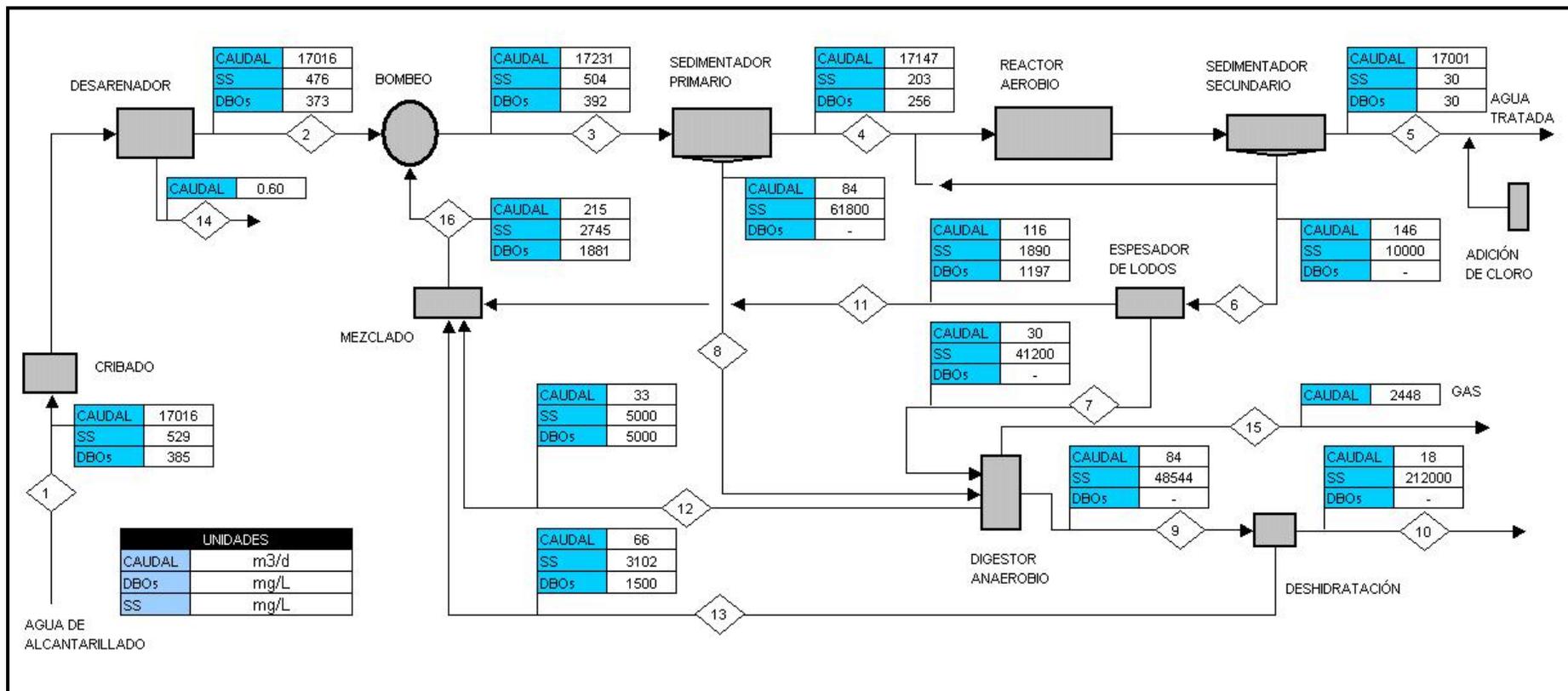
MEMORIA DE CÁLCULO DIGESTOR ANAEROBIO DE LODOS		
ÍTEM	VARIABLE	ECUACIONES Y RESULTADOS
1.	Cálculo del volumen del reactor	$V = Q * t_r = 114 * 10 d = 1140 m^3$ $V' = (1140) * (1.2) = 1368 m^3$
2.	Determinación de los sólidos volátiles que entran al reactor	$SV_{digestor} = (0.65)*(5212) + (0.8)*(1240) = 4380 kg/d$
3.	Estimación de los SV destruidos	$SV_{destr} = (0.5)*(4380) = 2190 kg/d$
4.	Cálculo del caudal de gas producido	$Q_{gas} = (2190) \times (1.12) = 2452 m^3/d$

#### 5.4 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO Y BALANCE DE MASA

El balance de masa para la planta de tratamiento, que se presenta en la ilustración 10 en forma de diagrama de flujo de proceso, tiene como base de cálculo un flujo de entrada de 197 L/s de agua residual, y las concentraciones materia orgánica y sólidos suspendidos totales que se muestran en el Anexo 2, correspondientes a 385 mg/L para la primera, y de 528 mg/L para la segunda característica.

Con éste tren de tratamiento se puede reducir la carga orgánica en cerca de un 90% y los sólidos suspendidos totales en un 95% aproximadamente del agua residual que se trata, cumpliendo y superando a la vez lo estipulado en la *Norma de Vertimiento para Descargas Orgánicas* para Colombia, estipuladas en el decreto 1594/84, artículos 72 y 73, la cual se presenta con mayor detalle en el Anexo 3.

En el Anexo 3 se puede ver de manera general un arreglo de lado planta que se propone, del cual se puede pensar en que el área requerida por la planta de tratamiento es aproximadamente 28,500 m<sup>2</sup>, y en el Anexo 4 se observa con un mayor nivel de detalle el proceso en un diagrama de tubería e instrumentos básico, en el que presentan las principales corrientes de proceso y alguna información técnica relevante.



CORRIENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
CAUDAL m <sup>3</sup> /d	17016	17016	17231	17147	17001	146	30	84	84	18	116	33	66	0.60	2448	215
DBO5 mg/L	385	373	392	256	30	-	-	-	-	-	1197	5000	1500	-	-	1881
SS mg/L	528	475	504	202	30	10000	41200	61800	48543	212000	1890	5000	3102	-	-	2745
P mg/L	12.3	12.3	12.3	10.5	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N org mg/L	4.10	4.10	4.10	3.5	3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH <sub>3</sub> mg/L	21.6	21.6	21.6	21.6	18.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Ilustración 10. Diagrama de proceso y cuadro de balance de masa para la planta de tratamiento de aguas residuales

## 5.5 ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN REQUERIDA

El estimado de costos consiste en un proceso de predicción del costo de los recursos, que van a ser necesarios en la ejecución completa de las actividades que hacen parte del proyecto[34]. En este caso, el capital total que se ha estimado como el necesario invertir para el desarrollo de la ingeniería, compra de equipo, instalación de facilidades y equipos, interconexión, pruebas, arranque y demás actividades necesarias para la puesta en servicio de la planta de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en la ciudad de Tunja, Colombia, con una capacidad de tratamiento de 197 L/s, corresponde aproximadamente a 4'900,000 de dólares americanos del 2004, sin incluir el capital de trabajo.

En el desarrollo de este estimado se emplearon técnicas y principios científicos, los cuales se encuentran apoyados en el criterio técnico y la experiencia de ingenieros y algunas empresas que han realizado proyectos similares. Por lo general, la realización del estimado de costos se apoya en la información que brindan diferentes fuentes, tales como las que se detallan a continuación[34]:

- El WBS (estructura de desglose de trabajo) del proyecto. Este documento es empleado para la organización del estimado de costos y para asegurar que todas las actividades identificadas en el WBS han sido incluidas en el estimado de costos.
- El documento de planeación de los recursos. Este documento contiene una descripción de la clase de recursos necesaria para el proyecto y la cantidad necesaria de cada elemento del WBS.
- Las tarifas o precios de los recursos (i.e. el costo de la hora hombre por especialidad, el costo del metro cúbico del material de relleno, el costo del metro de tubería de ciertas especificaciones, etc.).
- El documento de estimación de la duración de las actividades. El estimado de duración de las actividades afecta al estimado del costo en un proyecto cuando dentro del presupuesto se contemplan descuentos por concepto de costo de financiamiento.
- Información histórica. La información del costo de diferentes categorías de recursos puede ser hallada en las mismas fuentes que se pueden consultar para la estimación de la duración de las actividades, como lo son: archivos de proyectos

ejecutados, bases de datos para estimación de costos, conocimiento y experiencia del grupo de proyecto.

Existen principalmente tres categorías de estimados de costos, que se desarrollan dependiendo de la etapa de desarrollo en la que se encuentre el proyecto.

El primero de ellos es el estimado de orden de magnitud, también conocido como estimados *top-down* o *Rough Order Magnitude Estimates* (ROM), y se desarrolla en las primeras etapas del proyecto: la evaluación y planeación. Esta clase de estimado es poco costoso, pero a la vez poco preciso. Aunque el grado de desviación de estos estimados es de  $\pm 40\%$ [20], le permite al evaluador tener una idea de la magnitud del total del costo del proyecto, y con esto tomar la decisión de continuar con el proyecto o de elegir otra alternativa.

Para realizar un estimado de orden de magnitud es necesario tener acceso a información histórica de plantas o unidades de producción muy similares, y bastante cerca en cuanto a tamaño.

Los estimados intermedios (o estimados *bottom-up*), ofrecen mayor precisión y por lo tanto mayor confianza al evaluador. Estos estimados se desarrollan generalmente en las etapas de ingeniería conceptual y diseño básico[20], y sirven como base para tomar la decisión y obtener la aprobación de la ejecución del proyecto. Esta técnica requiere de la estimación del costo de diferentes conceptos individuales de trabajo; entre más detallados se hagan estos conceptos, más preciso y más costoso se vuelve el estimado. Esta técnica emplea diferentes herramientas para realizar el estimado. Entre los de mayor uso se encuentran el uso de curvas y de factores.

En el estimado por medio de curvas, se cuenta por lo general con gráficas para equipos, que relacionan la variable de diseño más representativa del equipo, con el costo del mismo. El rango de precisión para esta categoría de estimados es de  $\pm 20\%$ [20].

El estimado por medio de factores se basa en el principio de la existencia de un radio o factor entre el costo del equipo en particular, y el costo de los conceptos que han de ser tomados en cuenta para la instalación completa del equipo (p.e. la cimentación de un reactor, la instrumentación, la estructura de acero, la tubería de interconexión, soportes

para la tubería, pintura y aislamiento del reactor y de la tubería, transporte e instalación, etc). Para esta clase de estimados es necesario por lo menos tener conocimiento del costo del equipo mayor. La precisión alcanzada en estos estimados es de  $\pm 15\%$ [20].

Finalmente encontramos los estimados definitivos. Esta clase de estimados son los más precisos. Mientras los estimados de orden de magnitud y los estimados intermedios toman de horas a algunos días, los estimados definitivos pueden llegar a tomar varios meses para realizarlos, empleando miles de horas hombre[20] para su realización. Esta clase de estimados se puede ver como una extensión de los estimados intermedios, pero con mucho más detalle, y es el apropiado para realizar el control de costos del proyecto. Por lo general se trata de tenerlo preparado durante la etapa de la ingeniería de detalle[20]. El empleo de estas técnicas de estimación de costos va a depender de los recursos que se tengan disponibles para la realización del estimado (herramientas, tiempo, personal, dinero, información histórica, etc.), y del grado de precisión requerido, establecido por el objetivo final del estimado.

En éste caso particular, se ha realizado un estimado de orden de magnitud para el cálculo del costo del equipo principal de la planta, presentado en la Tabla 48. Para ello se empleó la información del costo de las unidades de tratamiento de una planta con capacidad de 900 L/s, un tren de tratamiento similar al que se propone en este documento y una factor de relación de 0.66. El factor de costos asociado a la instalación es del 45% del costo del equipo principal. La ecuación empleada es la siguiente:

$$Costo_2 = Costo_1 * \left( \frac{Capacidad_1}{Capacidad_2} \right)^{0.66} \quad (10)$$

Para la estimación de los diferentes conceptos que componen el estimado de costo de capital, como son los costos de equipo auxiliar, costo de ingeniería y construcción, contingencia, etc., se emplearon factores o porcentajes típicos empleados en el desarrollo de proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales, lo que corresponde al desarrollo de un estimado intermedio.

El estimado de costos realizado para la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para Tunja, con capacidad nominal de tratamiento de 197 L/s, indica que el proyecto requeriría un capital fijo aproximado de 4.9 millones de dólares

americanos, compuesto por 2.15 millones de dólares en equipo principal instalado, que con el equipo auxiliar asciende a 2.8 millones de dólares, y de los costos indirectos que suman cerca de 2.1 millones de dólares.

**Tabla 48. Estimado de costo de equipo principal instalado e inversión de capital fijo**

<b>EQUIPO PRINCIPAL</b>	<b>CANT.</b>	<b>COSTO C<sub>1</sub> (conocido) USD</b>	<b>COSTO C<sub>2</sub> USD</b>
EQUIPO DE CANAL DE DERIVACIÓN	1	\$ 197,441.33	\$ 73,167.43
EQUIPO CRIBAS FINAS- DESARENADORES	1	\$ 456,765.40	\$ 169,267.25
EQUIPO CÁRCAMO -CAJA DISTRIBUCIÓN	1	\$ 162,208.24	\$ 60,110.82
EQUIPO CLARIFICADOR DE PRIMARIOS	1	\$ 301,725.44	\$ 111,812.84
EQUIPO DE FOSAS DE AERACIÓN	1	\$ 534,006.76	\$ 197,891.21
EQUIPO SECUNDARIO	1	\$ 325,041.30	\$ 120,453.18
EQUIPO TANQUE CONTACTO DE CLORO	1	\$ 79,482.74	\$ 29,454.6
EQUIPO CÁRCAMO LODOS ACTIVADOS	1	\$ 46,114.47	\$ 17,089
EQUIPO DIGESTORES ANAEROBIOS	1	\$ 724,446.72	\$ 268,464.1
EQUIPO DE SOPLADORES	1	\$ 318,527.51	\$ 118,039.3
EQUIPO DE EDIF. DE CLORACIÓN	1	\$ 194,303.40	\$ 72,004.6
EQUIPO EDIF. ADMÓN. Y LABORATORIO	1	\$ 6,008.96	\$ 2,226.8
EQUIPO DE PLANTA DE LODOS	1	\$ 662,566.04	\$ 245,532.5
<b>TOTAL EQUIPO PRINCIPAL</b>		<b>\$ 4,008,638.31</b>	<b>\$ 1,485,513.5</b>
<b>COSTO TOTAL EQUIPO PRINCIPAL INSTALADO (CTEP)</b>			<b>2,153,994.6</b>

<b>COSTO DE EQUIPO COMPLEMENTARIO AUXILIAR</b>	<b>RANGO</b>	<b>PORCENTAJE TÍPICO DEL EQUIPO PRINCIPAL</b>	<b>COSTO NETO USD</b>
TUBERÍAS DE PROCESO	8 - 15%	10%	\$ 215,399.7
ELÉCTRICO	5 - 12%	8%	\$ 172,319.6
INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL	3 - 10%	5%	\$ 107,699.7
VEHÍCULOS	1 - 2%	2%	\$ 43,079.9
MEJORAS DEL SITIO	1 - 10%	5%	\$ 107,699.7
<b>COSTO TOTAL DE EQUIPO COMPLEMENTARIO AUXILIAR (CTEA)</b>			<b>\$ 646,198.4</b>
<b>COSTOS TOTAL DIRECTOS (CTD = CTEP + CTEA)</b>			<b>\$ 2,800,193</b>

<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	<b>RANGO</b>	<b>PORCENTAJE TÍPICO DEL EQUIPO PRINCIPAL</b>	<b>COSTO NETO USD</b>
INGENIERÍA Y SUPERVISIÓN DE CONSTRUCCIÓN	10 - 15%	15%	\$ 420,028.9
CONTINGENCIA	10 - 15%	15%	\$ 420,028.9
GASTOS DE CONSTRUCCIÓN		40%	\$ 1,120,077.2
HONORARIOS CONTRATISTA	2 -6%	4%	\$ 112,007.7
<b>COSTO TOTAL INDIRECTOS (CTI)</b>			<b>\$ 2,072,142.8</b>
GASTOS DE PRE-OPERACIÓN Y ARRANQUE (CAO)		1%	<b>\$ 28,001.9</b>
<b>INVERSIÓN DE CAPITAL FIJO (CTD+CTI+CAO)</b>			<b>\$ 4,900,337.8</b>

## 5.6 EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO

El presente proyecto fue evaluado en los términos de indicadores de rentabilidad, flujos de efectivo a lo largo de horizonte de evaluación y ahorros obtenidos por la realización del proyecto, que hacen parte de los parámetros requeridos para efectuar el análisis Costo-Beneficio de Programas y Proyectos de Inversión.

Esta evaluación financiera parte de la base de que como *ejecutor* del proyecto se tienen a las Entidades de Servicio Público, encargadas de la administración de los sistemas de Acueducto y Alcantarillado, mientras que el gobierno colombiano es el *inversionista*, al fijar la rentabilidad mínima, al suministrar la estructura financiera y los recursos económicos para la realización del proyecto.

### 5.6.1 Criterios empleados para la evaluación financiera

1. Horizonte de evaluación de 20 años
2. La tasa de interés que se empleó fue la correspondiente al interés cobrado por la entidad financiera que realiza el préstamo para la inversión, en este caso corresponde al promedio ponderado total de la tasa de colocación<sup>21</sup> reportada por el Banco de la República[2] en el mes de diciembre de 2003, correspondiente al 13.79% efectivo anual.
3. Se considera un valor de rescate al final del horizonte de evaluación de cero.

<sup>21</sup> Es la tasa de interés que cobran las entidades bancarias por poner dinero en circulación en el sistema económico, por medio de préstamos.

4. La Tasa Representativa de Mercado empleada es la correspondiente al 31 de diciembre de 2003 igual a 2,778.2 pesos colombianos por dólar americano[2].
5. Los valores de la tasa retributiva que se emplean son los vigentes en el periodo comprendido entre el 1 de enero al 31 de diciembre de 2003. Estas tarifas definen la tasa retributiva<sup>22</sup> para DBO en 74.24 \$/Kg. y para SST en 31.75 \$/Kg.
6. Los ingresos por ahorro corresponden a la eliminación del pago de dinero por concepto de los vertimientos puntuales al río Chicamocha, producto del tratamiento de un caudal de agua residual aproximado de 6.2 millones de metros cúbicos anuales (equivalentes a 197 L/s).
7. La cantidad removida anualmente de DBO y SST es de 2,203 y 3,090 toneladas respectivamente.
8. Los costos de Operación y Mantenimiento de la planta se estimaron a través de un estimado de orden de magnitud, tomando como base los costos de una planta similar de mayor capacidad de tratamiento, y un factor de 0,6. Estos costos son aproximadamente 1.26 millones de dólares anuales. Considera los conceptos de personal, mantenimiento, seguros, imprevistos, energía eléctrica, reactivos y disposición de lodos.
9. El costo por concepto de seguros se estimó como el 2.3% de la suma de los costos de personal, mantenimiento, imprevistos, energía eléctrica, reactivos y disposición de lodos.
10. El costo por concepto de imprevistos se estimó como el 2.9% de la suma de los costos de personal, mantenimiento, energía eléctrica, reactivos y disposición de lodos.

### **5.6.2 Estimación de los costos de operación y mantenimiento anuales**

El estimado de los costos de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento se realizó empleando los valores reportados para una planta de tratamiento que opera con un tren de tratamiento similar al propuesto en este trabajo. Este estimado se presenta en la Tabla 49.

---

<sup>22</sup> Valor de la tasa en pesos colombianos actualizados al 2003.

Tabla 49. Estimado de los costos de operación y mantenimiento

CONCEPTO DE COSTO	VALOR USD/año	DESCRIPCIÓN	ESTIMACIÓN DE COSTO
PERSONAL	774,900	1 Gerente de Planta 4 Ingeniero de turno 1 Ingeniero Mecánico 1 Secretaria 8 Operadores 8 Trabajadores	Este costo de personal se tomó igual al reportado para una planta de tratamiento con capacidad de 900 L/s, y la cantidad de personal antes descrita.
MANTENIMIENTO	43,735	$C_2 = 142,690 * \left(\frac{197}{1200}\right)^{0.66}$	Los costos de mantenimiento toman en cuenta costos de mantenimiento de edificios y planta, energía eléctrica de edificios e instalaciones complementarias de una planta de tratamiento similar con capacidad de 1200 L/s.
ENERGÍA ELÉCTRICA	316,055	$C_2 = 852,870 * \left(\frac{197}{900}\right)^{0.66}$	Se realizó escalando los costos para una planta de tratamiento similar con capacidad de 900 L/s. Incluye los consumos de los motores de equipos de tratamiento y consumo de edificios.
REACTIVOS (Cloro)	16,525	$C_2 = 6'307,200 * 0.00264$	Toma en cuenta un costo de cloro de $2.64 \times 10^{-3}$ USD por m <sup>3</sup> de agua tratada. La dosis aplicada es de 5 g/m <sup>3</sup>
DISPOSICIÓN DE LODOS	14,922	$C_2 = 3,157 * \left(\frac{18.9}{77.54}\right)^{0.66}$	Estimado realizado sobre el costo base de tratamiento de 77.5 m <sup>3</sup> /d de lodos.
IMPREVISTOS	33,800	$C_2 = 0.029 * (1'166,137)$	Se supone como el 2.9 % de la suma de los costos anteriores.
SEGUROS	28,316	$C_2 = 0.023 * (1'197,955)$	Se estima como el 2.3 % de la suma de los costos de personal, mantenimiento, energía, reactivos, disposición de lodos e imprevistos.
<b>TOTAL</b>	<b>1'288,553</b>		

### 5.6.3 Estimación del valor de pago anual de la inversión

El cálculo del valor de la anualidad requerida en el proyecto para pagar la inversión, se realizó tomando como criterio 20 años de horizonte de evaluación y una tasa de interés comercial del 13.8 % anual. El valor de la amortización resulta entonces igual a 574,308 USD cada año. La ecuación se presenta en la tabla resumen número 50.

**Tabla 50. Estimación del valor de amortización de la inversión**

CONCEPTO	VALOR	ECUACIÓN
INVERSIÓN	4.9 MMUSD	$Inversión = A * \left( \frac{(1+i)^k - 1}{i * (1+i)^k} \right)$
INTERÉS ANUAL (i)	13.8 %	
HORIZONTE DE EVALUACIÓN (k)	20 años	

#### 5.6.4 Cálculo del beneficio generado

El beneficio supuesto por la realización del proyecto, corresponde al dinero que se recibe al reducirse el pago de la tasa retributiva por vertimiento puntual. Aunque en este estimado sólo se tome en cuenta el ahorro por reducción en los pagos que por ley se debe hacer a las Corporaciones Autónomas Regionales respectivas, existen diferentes conceptos que deben ser incluidos en la estimación, en la medida en que se contemplen diferentes escenarios en los que se le dé un uso adicional al agua tratada que sale de la planta de tratamiento, como la venta del agua tratada.

En el caso de la venta del agua tratada para fines de irrigación, se podría percibir por dicho concepto una cantidad de dinero aproximado de 252,000 USD por año, correspondiente a la venta de 6.2 millones de metros cúbicos al año, a un precio de 0.04 USD/m<sup>3</sup> [5]. Sin embargo, estos beneficios corresponden a conceptos tangibles, pero hay que tener en cuenta los beneficios intangibles, que surgen al cuantificar el impacto que tiene sobre el ambiente el efecto de la disminución en contaminación del río Chicamocha, el aumento en la disponibilidad de agua fresca en los cuerpos naturales de agua, la reducción de la posibilidad de sufrir epidemias que se originan del consumo y contacto con aguas contaminadas, y el estímulo al desarrollo económico regional que representa el poder contar con agua apta para riego en una región que se caracteriza por basar su economía en la agricultura, entre otros.

Aunque se sabe por sentido común, que la construcción de una planta de tratamiento que descontamine el agua residual que se vierte al río trae un alto beneficio a la comunidad, al ambiente y a la economía regional, no está disponible por el momento el estudio que permita a través de criterios de evaluación integral, realizar la cuantificación económica del impacto de la descontaminación del agua residual generada en el municipio. Por tal motivo, se incluye en el estudio económico del proyecto únicamente el

beneficio relacionado con el ahorro de dinero por reducción en el pago de la tasa retributiva, y que se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 51. Cálculo del beneficio generado por reducción en pago de tasas retributivas**

<b>CONTAMINANTE</b>	<b>CARGA REMOVIDA</b> <i>Ton/año</i>	<b>TASA RETRIBUTIVA</b> <i>USD/Ton</i>	<b>DINERO AHORRADO</b> <i>USD/año</i>
DBO	2,203	26.72	58,865
SST	3,090	11.43	35,315
<b>TOTAL</b>			<b>94,180</b>

### **5.6.5 Balance anual de flujos de efectivo y Tasa Interna de Retorno**

Una vez calculados las cantidades correspondientes a los flujos anuales de dinero, asignados al beneficio, amortización de la inversión y a los costos de operación y mantenimiento, se calcula el balance anual de efectivo, considerando los valores de costos como negativos y los de beneficio como positivos. En la Tabla 52 se pueden observar el resultado, el cual es negativo.

Este flujo anual de efectivo supone un déficit en el financiamiento, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento. Este déficit de dinero podría ser asumido por el usuario del servicio a través de la facturación, como lo contempla la política de agua potable y saneamiento básico del gobierno colombiano, en la que los costos eficientes de inversión, operación y administración de los servicios se recuperan fundamentalmente a través del cobro de tarifas a los usuarios de los mismos, y que se refleja en lo establecido en el principio de recuperación de costos de la Ley 142 de 1994, en donde una vez construidos los sistemas de tratamiento, la recuperación de los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento se deben reflejar en la tarifa de los usuarios[6].

Para alcanzar el costo de oportunidad del 12%, tasa de rentabilidad aceptable para la financiación de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales por parte del gobierno colombiano, se necesitaría una entrada adicional de efectivo por año, que supere el déficit presentado cubriendo los costos de operación y mantenimiento, así como el costo financiero de la inversión.

**Tabla 52. Balance anual de flujos de efectivo**

<b>COSTOS DEL PROYECTO</b>	<b>VALOR USD</b>
COSTO ANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	(-) 1'288,553
COSTO ANUAL POR CONCEPTO DE PAGO DE LA INVERSIÓN	(-) 574,308
BENEFICIO POR AHORRO DE PAGO DE TASA RETRIBUTIVA POR AÑO	(+) 94,180
<b>TOTAL</b>	<b>(-) 1'768,681</b>

El cálculo de dicha cantidad de dinero se presenta en la Tabla 53. Tomando como base una tasa interés del 12% y el costo de la inversión, se calcula el valor de las anualidades requeridas que son equivalentes en el tiempo al valor de la inversión en el año cero. La ecuación que expresa lo expuesto para el balance de efectivo en el año cero es:

$$Inversión = Anualidad * \left( \frac{(1 + TIR)^{periodo} - 1}{TIR * (1 + TIR)^{periodo}} \right) \quad (11)$$

$$4.9 \text{ MMUSD} = A_x * \left( \frac{(1 + 0.12)^{20} - 1}{0.12 * (1 + 0.12)^{20}} \right)$$

Despejando de la ecuación anterior la anualidad se obtiene el valor aproximado de 656,000 dólares por año, que es el valor requerido al final del ejercicio del balance anual de flujo de efectivo. La cantidad adicional que se requiere para obtener dicho resultado, se obtiene a través de la solución de la siguiente ecuación:

$$656,000 = F_{adicional} - \text{Costo O\&M} - \text{Costo Financiero} + \text{Beneficio} \quad (12)$$

$$656,000 = F_{adicional} - 1'288,553 - 574,308 + 94,180$$

$$F_{adicional} = 2'424,730 \text{ USD/año}$$

**Tabla 53. Flujo de efectivo adicional por año para alcanzar el costo de oportunidad del 12%**

<b>CONCEPTO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>
INVERSIÓN	USD	4'900,338
PERIODO DE EVALUACIÓN	años	20
TASA INTERNA DE RETORNO NECESARIA	%	12
BALANCE ANUAL NECESARIO	USD	656,000

FLUJO DE EFECTIVO ANUAL ADICIONAL	USD	2'424,730
-----------------------------------	-----	-----------

El cálculo anterior revela que es necesario percibir dentro de los beneficios anuales, resultado de la operación de la PTAR, la cantidad aproximada de 2'424,730 dólares para obtener una rentabilidad del 12%.

Esta cantidad de dinero, al ser recaudada a través del cobro al usuario en la tarifa de acueducto y alcantarillado, representaría un aumento en la facturación del servicio aproximado de 0.38 dólares por metro cúbico tratado de agua residual. Este aumento en la tarifa del servicio corresponde al valor faltante de 2'424,730 USD dividido entre una capacidad anual de tratamiento igual a 6.4 millones de metros cúbicos.

Tomando como base una tarifa media de acueducto y alcantarillado de 0.23 USD/m<sup>3</sup> y 0.11 USD/m<sup>3</sup> respectivamente[21] para la ciudad de Tunja, el aumento por inclusión de los costos de amortización de la inversión, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de agua residual de la ciudad, representaría alrededor de un 110% sobre la tarifa base. Al tomar en cuenta la posibilidad de vender el agua tratada a un precio comercial de 0.04 USD/m<sup>3</sup>, el aumento en la facturación del servicio sería aproximadamente de 0.34 dólares, lo que representa un 99% sobre la tarifa base. De un modo u otro, la inclusión de los costos de tratamiento y operación del sistema de tratamiento de aguas residuales en la tarifa del servicio, afectaría de forma sensible en la capacidad de pago de los usuarios.

En los estimados anteriores, el valor del flujo anual que corresponde al concepto de reposición de las instalaciones no se toma en cuenta, ya que su inclusión aumentaría el enorme impacto social que tiene la incorporación del costo del tratamiento del agua residual en la tarifa de los servicios de acueducto y alcantarillado, y mucho más cuando se trata de regiones en desarrollo.

Sería necesario entonces que el gobierno impulse políticas, mecanismos y acciones encaminadas a promover la captación de recursos económicos de fuentes diferentes al usuario, necesarios para la reposición de los bienes de manera que sea posible conservar la capacidad operativa y productiva del sistema de tratamientote aguas residuales.

## 5.7 PROGRAMA DE EJECUCIÓN

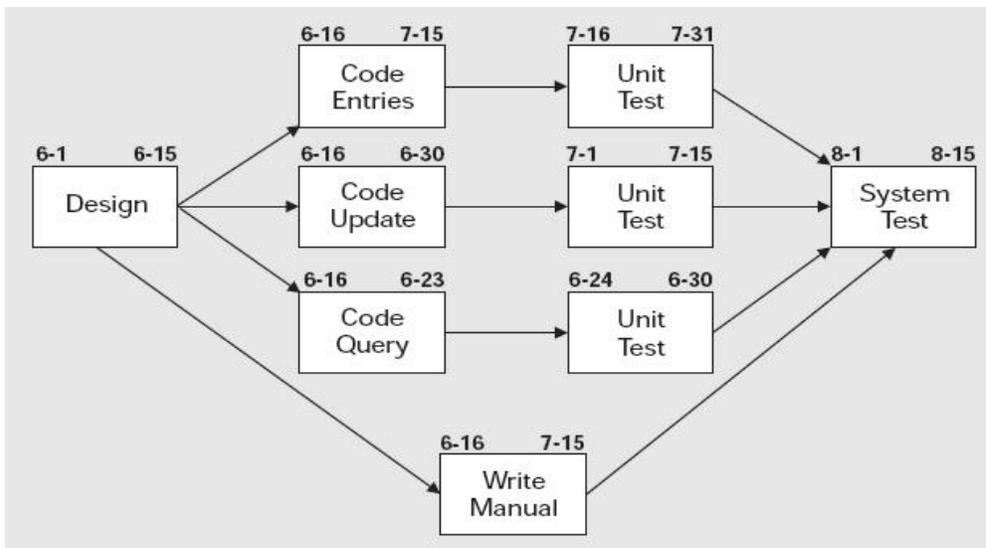
El objetivo del desarrollo de un calendario o programa de ejecución del proyecto es determinar las fechas de inicio y fin de las actividades del proyecto. Estas fechas han de ser las más cercanas a la realidad para que el proyecto sea concluido en el tiempo programado. El desarrollo del programa es frecuentemente un proceso iterativo[34] que interactúa con los procesos de estimado de costos y duración de actividades. La información o documentos que por lo general se emplean en la realización del programa de actividades son:

- El diagrama de red del proyecto.
- El estimado de duración de las actividades.
- La cantidad de recursos destinados para el desarrollo de las actividades, al igual que los periodos de tiempo en los que están disponibles.
- El programa en el que se definan los periodos de tiempo que se asumen como laborables (p.e. no se labora en días festivos, vacaciones o periodos de entrenamiento de personal), el número de horas que se trabajan en dichos periodos (p.e. hay grupos de proyecto que trabajan en horas de oficina, mientras existen otros que trabajan en turnos las 24 horas del día).
- Las restricciones y suposiciones. En este caso existen dos clases de restricciones: las fechas impuestas y las fechas claves. Las primeras pueden obedecer a eventos meteorológicos (p.e. inicio de temporada de lluvias), a eventos políticos (p.e. entrada en vigencia de normatividad), entre otros. Las fechas claves se fijan muchas veces siguiendo peticiones específicas del cliente del proyecto, condiciones particulares de los proveedores, a exigencias mismas de la programación del proyecto, etc.

Dentro de las técnicas y herramientas que se emplean en el desarrollo de un programa de proyecto se encuentran el análisis matemático, simulación por computador, distribución heurística de recursos y el software de administración de proyectos[34]. El producto final del desarrollo de un programa de proyecto se puede presentar de diferentes maneras. Aunque el programa se puede presentar en forma tabular, es más empleada la forma gráfica, la cual utiliza varios formatos como:

- Un diagrama de red de proyecto. Este diagrama mostrado en la ilustración 11 por lo general presenta la secuencia lógica de las actividades y la ruta crítica del proyecto.

- Un diagrama de barras, también conocido como diagrama de Gantt en la Ilustración 12, muestra el inicio y el fin de cada actividad, lo mismo que la duración esperada. Usualmente no se muestran las dependencias que existen entre actividades.
- Una carta de fechas claves. Contiene información similar al diagrama de Gantt, pero muestra el inicio o el fin de ciertas actividades, que por diferentes circunstancias han de ser cumplidas en las fechas dispuestas. Estas actividades son prácticamente inamovibles. Una carta de este tipo se puede apreciar en la ilustración 13.
- Un diagrama de red de proyecto con escala de tiempo, como el que se muestra en la ilustración 14, es una mezcla de un diagrama de red de proyecto y un diagrama de Gantt, y reúne información sobre la duración de las actividades, su secuencia lógica y su distribución en el tiempo.



**Ilustración 11. Diagrama de red de proyecto empleando fechas de programación. (Fuente: Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*, PMI Publishing Division, USA,1996)**

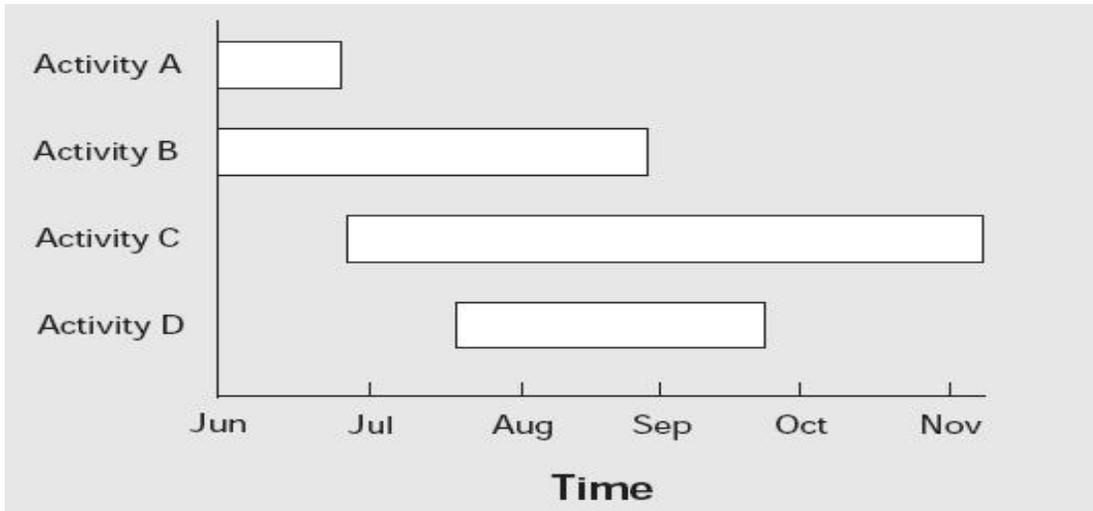
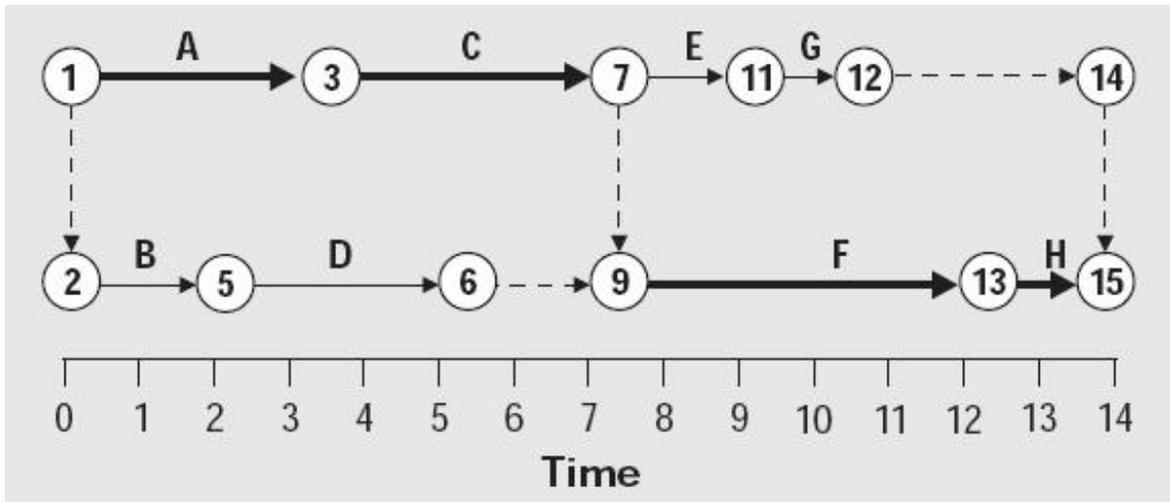


Ilustración 12. Diagrama de barras de Gantt. (Fuente: Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*, PMI Publishing Division, USA,1996)

Event	Data Date							
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug
Subcontracts Signed			▲▼					
Specifications Finalized				▲▼				
Design Reviewed					▲			
Subsystem Tested						▲		
First Unit Delivered							▲	
Production Plan Completed								▲

Ilustración 13. Carta de fechas clave del proyecto. (Fuente: Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*, PMI Publishing Division, USA,1996)

Generalmente, anexo a estos documentos se presentan las restricciones y las suposiciones que se tuvieron en cuenta en la realización del programa de proyecto.



**Ilustración 14. Diagrama de red con escala de tiempo. (Fuente: Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge, PMI Publishing Division, USA, 1996)**

Como ejemplo, se presenta en forma de diagrama de Gantt en la ilustración 15, el programa de ejecución de las obras constructivas para el sistema de tratamiento de aguas residuales que se propone para el caso de estudio. El lapso de ejecución se estima en 18 meses a partir de febrero del 2006. Las actividades que se presentan son las principales, y siguen una secuencia constructiva lógica.

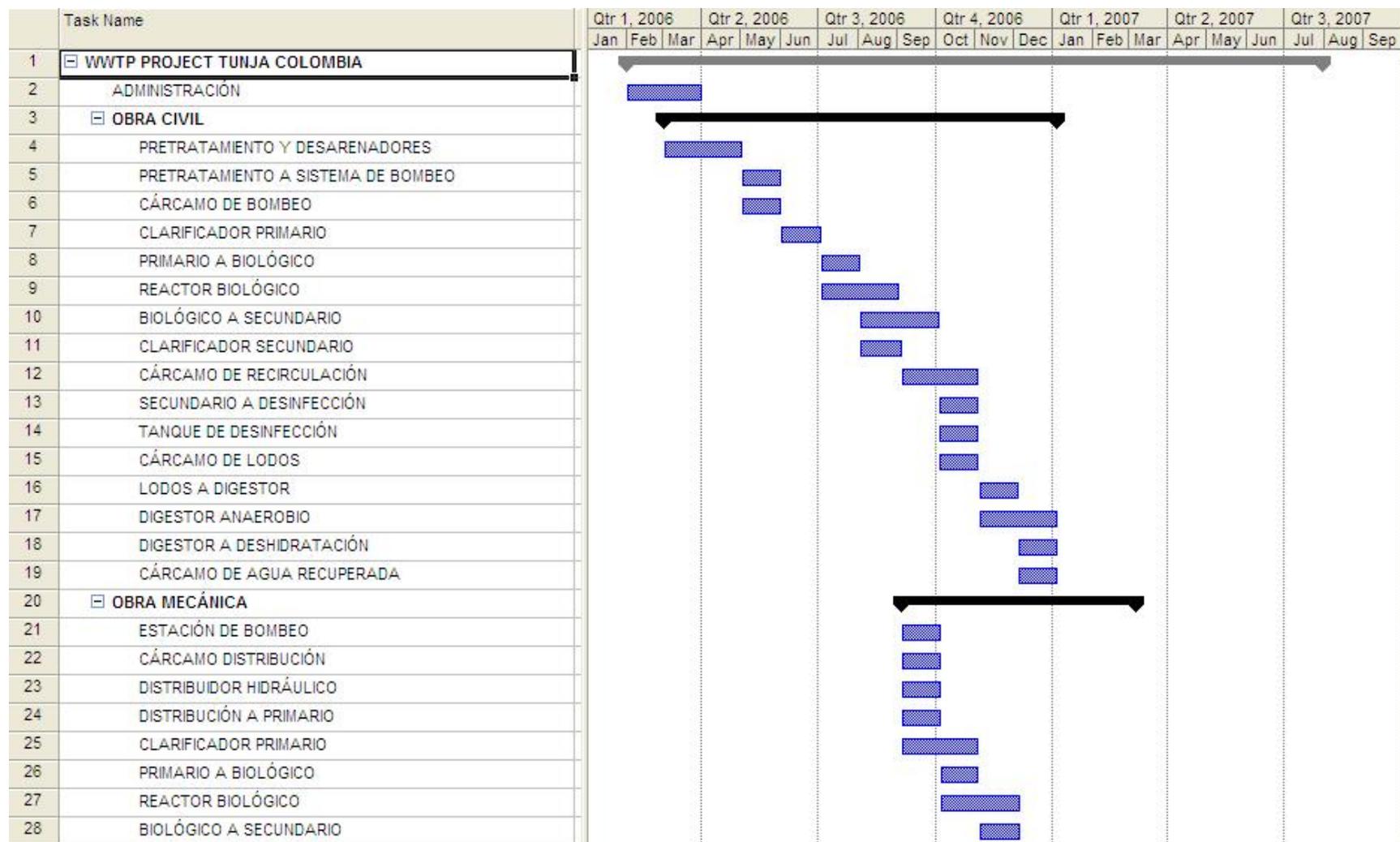


Ilustración 15. Diagrama de Gantt de las actividades del proyecto de construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Tunja-Colombia.

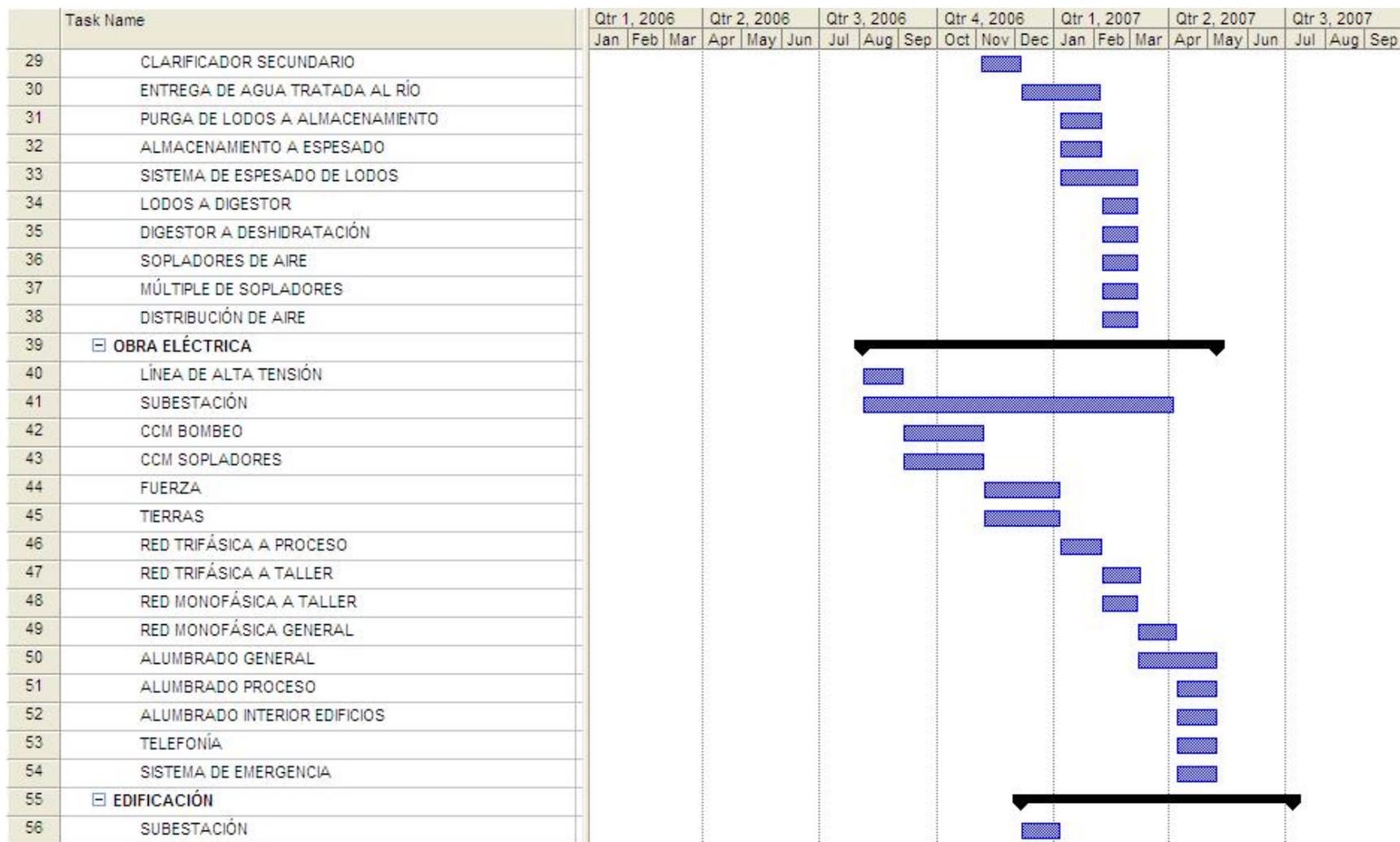
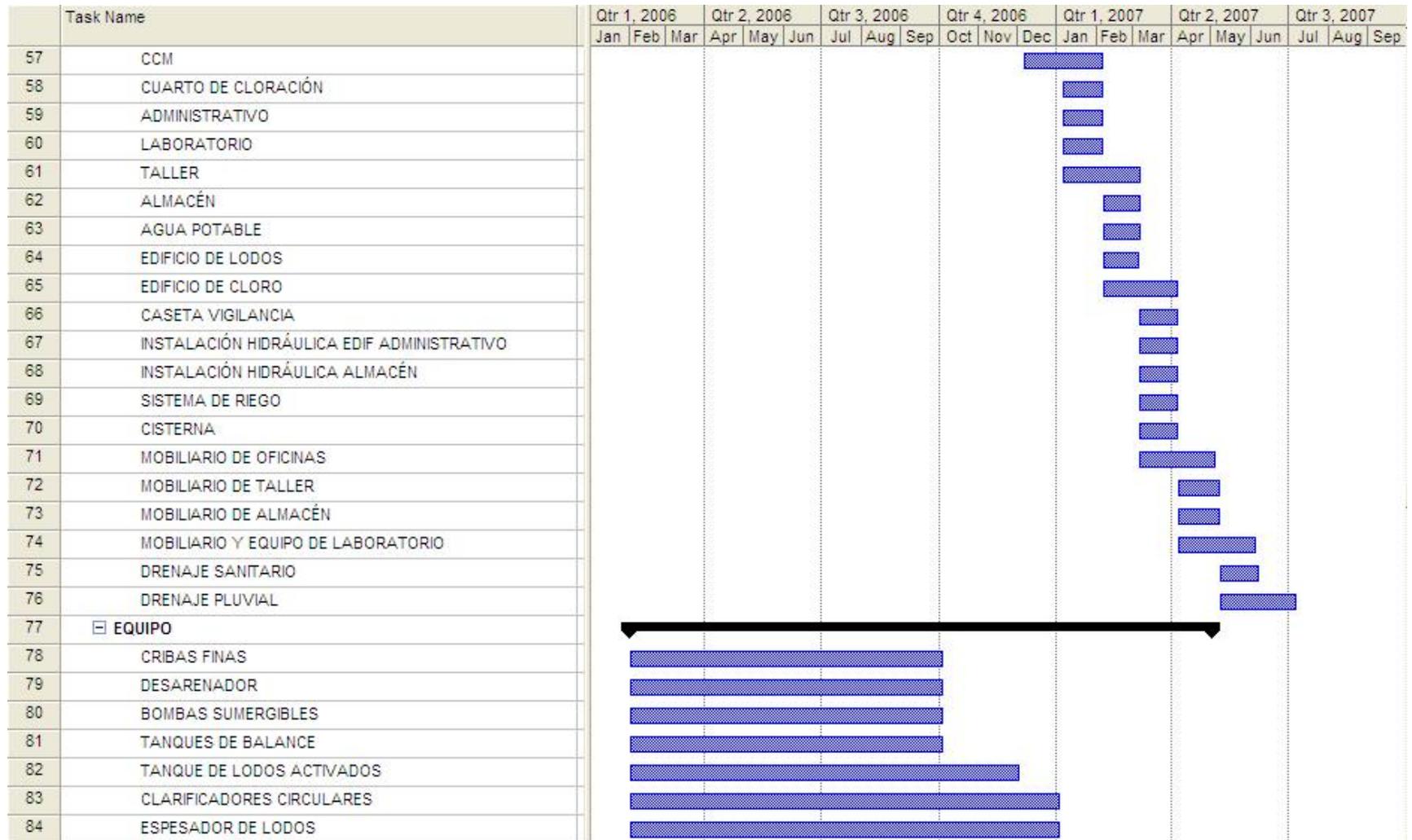


Ilustración 15. Diagrama de Gantt de las actividades del proyecto de construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Tunja-Colombia.



**Ilustración 15. Diagrama de Gantt de las actividades del proyecto de construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Tunja-Colombia.**

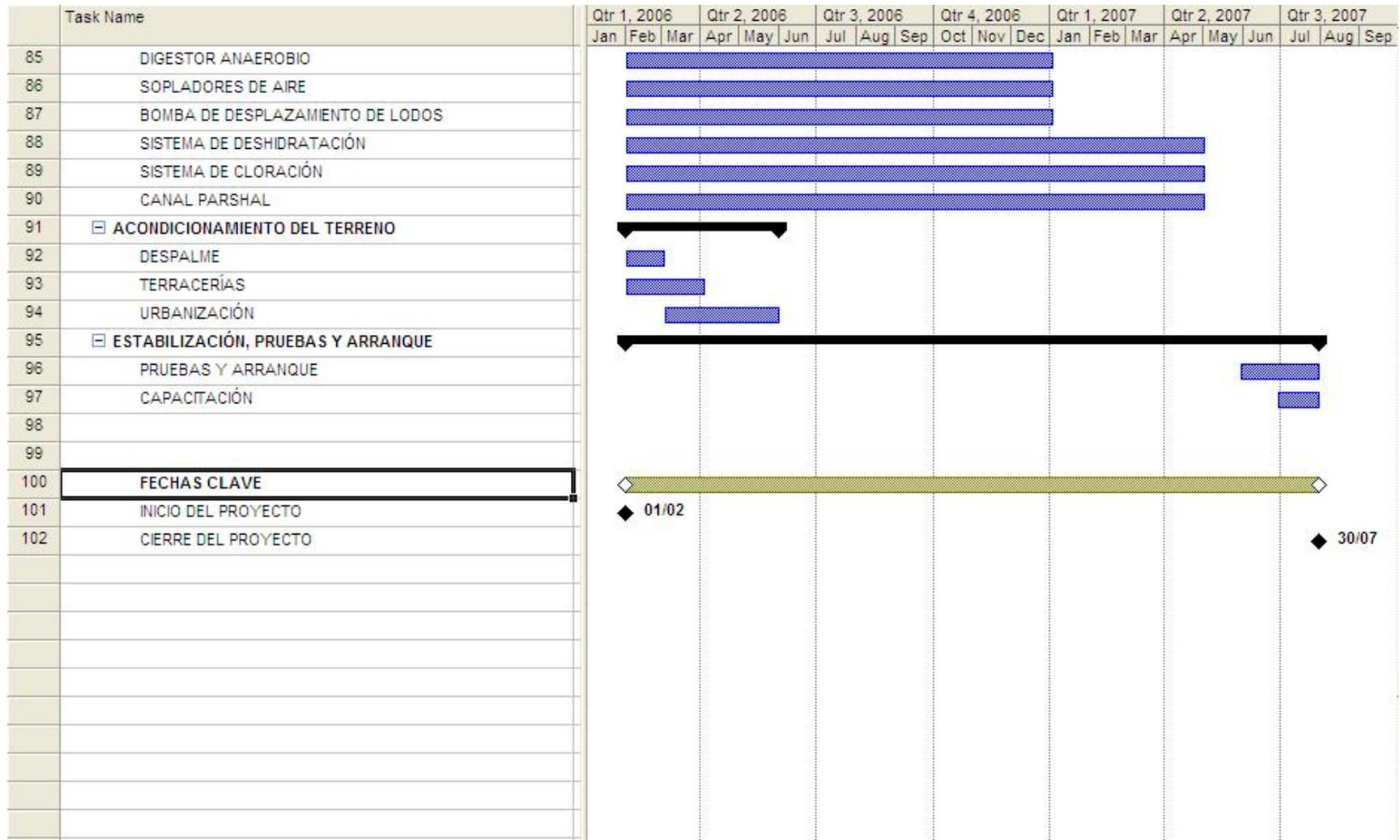


Ilustración 15. Diagrama de Gantt de las actividades del proyecto de construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Tunja-Colombia.

## 5.8 HOJA TÉCNICA, ECONÓMICA Y SOCIAL DEL PROYECTO

HOJA TÉCNICA, ECONÓMICA Y SOCIAL DEL PROYECTO				
DATOS GENERALES				
PROYECTO:	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL			
UBICACIÓN:	TUNJA - COLOMBIA			
CAPACIDAD DE TRATAMIENTO DE LA PLANTA:	17,020			m <sup>3</sup> /d
EXTENSIÓN APROXIMADA DEL TERRENO:	28,500			m <sup>2</sup>
INVERSIÓN DE CAPITAL:	4.9			Millones USD
PLAZO DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO:	18			meses
TIPO DE PROCESO:	TRATAMIENTO CON LODOS ACTIVADOS			
PRETRATAMIENTO:	CRIBADO, DESARENADO Y SEDIMENTACIÓN PRIMARIA			
LODOS:	DIGESTIÓN ANAEROBIA Y SECADO			
TRATAMIENTO FÍSICO:	SEDIMENTACIÓN Y CLARIFICACIÓN			
TRATAMIENTO QUÍMICO:	DESINFECCIÓN CON CLORO			
CONSUMO APROXIMADO DE ENERGÍA ELÉCTRICA:	315,000			KWh/mes
CONSUMO APROXIMADO DE AIRE PARA PROCESO:	94,300			m <sup>3</sup> /día
EQUIPO PRINCIPAL E INFORMACIÓN TÉCNICA				
EQUIPO PRINCIPAL	CAPACIDAD APROXIMADA		MATERIAL	
DESARENADOR	29	m <sup>3</sup>	VER NOTA	
SEDIMENTADOR PRIMARIO	2,080	m <sup>3</sup>		
REACTOR DE AIREACIÓN	4,250	m <sup>3</sup>		
SEDIMENTADOR SECUNDARIO	3,700	m <sup>3</sup>		
ESPEADOR DE LODOS	8	m <sup>3</sup>		
REACTOR ANAEROBIO	1,370	m <sup>3</sup>		
SOPLADOR DE AIRE*	4,000	m <sup>3</sup> /h		
NOTA: El material de fabricación del equipo principal es concreto.				
* No se incluye material del soplador de aire.				
PARÁMETROS	ENTRADA	UNIDAD	SALIDA	UNIDAD
DBO <sub>5</sub>	385	mg/L	30	mg/L
SST	528	mg/L	30	mg/L
FÓSFORO	12.3	mg/L	8.5	mg/L
NITRÓGENO ORGÁNICO	4.1	mg/L	3	mg/L
NITRÓGENO NH <sub>3</sub>	21.6	mg/L	18.4	mg/L
NOTAS:				
1. El dimensionamiento de los equipos principales del proceso cumplen con el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000 para Colombia, así como recomendaciones de la literatura especializada.				
2. Los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica estimados para la Planta de Tratamiento, cumplen y superan los establecidos en el Decreto 1594 de 1984, cumpliendo así con las normas nacionales sobre vertimientos de Colombia, y cumpliendo a su vez con recomendaciones de la literatura especializada en el tema.				

**HOJA TÉCNICA, ECONÓMICA Y SOCIAL DEL PROYECTO**  
**INFORMACIÓN FINANCIERA**

COSTO ANUAL DE O & M.	1'288,553	USD/año
COSTO DE PAGO DE LA INVERSIÓN.	574,310	USD/año
BENEFICIO POR REDUCCIÓN EN PAGO DE TASA RETRIBUTIVA.	94,180	USD/año
PERIODO DE EVALUACIÓN.	20	años
COSTO DE OPORTUNIDAD.	12%	
FINANCIAMIENTO ADICIONAL PARA OPERACIÓN CON TIR DE 12%.	2'424,730	USD/año

FUENTE DE RECURSOS	INSTRUMENTO DE FINANCIACIÓN
1. TARIFAS DE ALCANTARILLADO	* TARIFA DE SERVICIO A USUARIO.
2. SECTOR AMBIENTAL	* TASAS RETRIBUTIVAS, PORCENTAJE DE GRAVÁMENES A PROPIEDAD INMUEBLE, TRANSFERENCIAS DEL SECTOR ELÉCTRICO.
3. RECURSOS FISCALES	* TRANSFERENCIAS DE INGRESOS CORRIENTES DE LA NACIÓN.

**PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS SOCIALES Y AMBIENTALES DEL PROYECTO**

1. Abastecimiento de agua tratada de forma permanente.
2. Inversión en sistemas de tratamiento de aguas residuales, al igual que en sistemas de alcantarillado.
3. Aumento en la capacidad de autorregulación hídrica de la región, y disminución en los índices de escasez.
4. Cumplimiento con el Plan de Descontaminación del río Chicamocha.
5. Disminución en el pago de las tasas retributivas por vertimientos puntuales.
6. Alternativa de solución de mayor impacto y duración, ante el problema de escasez de agua fresca en la región.
7. Mejoramiento en la calidad hídrica del río Chicamocha.
8. Alternativa que estimula el desarrollo económico de la región (especialmente agrícola).
9. Recarga de los cuerpos naturales de agua.
10. Cargo de los costos de inversión, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento al usuario del servicio.
11. Generación de composta para empleo en actividades de agricultura.

**FACTIBILIDAD DE REALIZACIÓN DE PROYECTO**

Con la participación de la Corporación Autónoma de Boyacá CORPOBOYACÁ en el Programa de Cooperación Horizontal del Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, se acordó dar paso al proceso de concertación para la descontaminación de la cuenca alta del Río Chicamocha, en el departamento de Boyacá, Colombia.

Este proyecto supera los límites fijados para el periodo comprendido entre el año 2001 y 2005 por las dos instituciones, de porcentajes de remoción de carga cercanos al 14%, tanto para materia orgánica como para sólidos suspendidos totales. Adicionalmente, se han creado en el país los medios para acceder al financiamiento de proyectos de tipo ambiental, entre los que se encuentran los recursos provenientes de las tarifas del servicio de acueducto y alcantarillado, recursos provenientes del sector ambiental y del sector fiscal de la nación.

Sin embargo, la realización del proyecto está condicionada a la consecución de financiamiento adicional cercano a los 2.5 millones de dólares anuales, que soporte la operación anual de la planta de tratamiento, de tal forma que se logre alcanzar una Tasa Interna de Retorno de la inversión del 12%, que exige el gobierno para la financiación de un proyecto de esta clase.

# CONCLUSIONES

## VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

El desarrollo de la metodología que se planteó al inicio de este trabajo, permitió seleccionar la tecnología más conveniente para el proyecto, dentro de una serie de alternativas tecnológicas con que se contaba, al igual que permitió determinar las características principales de la tecnología de proceso. Dichas características son las de un proceso biológico con lodos activados de aireación extendida para el tratamiento del agua residual, y un tratamiento anaerobio para la estabilización de los lodos activados, producto del tratamiento biológico, con una capacidad de tratamiento en la planta de alrededor de 17,000 metros cúbicos diarios.

En cuanto a la determinación de los impactos económicos que tendría el proyecto en la población, se pudo establecer a través de la evaluación económica y financiera, que bajo las condiciones financieras e institucionales establecidas por el gobierno colombiano, no es viable el proyecto. Lo anterior debido a que el flujo de dinero anual que representa los ingresos reportados por la ejecución del proyecto, es mucho menor al que representa los costos financieros, de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento, presentando una diferencia de alrededor de 1.7 millones de dólares americanos.

Una alternativa para alcanzar la rentabilidad exigida por las instituciones de financiamiento del gobierno colombiano, sería la inyección anual de capital al proyecto, de aproximadamente 2.4 millones de dólares americanos. Dicha suma de dinero podría provenir del pago efectuado por los usuarios del servicio de acueducto y alcantarillado, lo que está contemplado por la ley. Sin embargo, esta medida representaría un aumento aproximado del 110% sobre la tarifa base del servicio, lo que tendría un importante impacto social y económico en la capacidad de pago del usuario.

## METODOLOGÍA DE DESARROLLO Y CASO DE ESTUDIO

En este proyecto se planteó como objetivo desarrollar una metodología para la formulación y evaluación de proyectos de tratamiento de aguas residuales municipales, cuyo desarrollo estuviera dentro del contexto de desarrollo sostenible.

La metodología presentada en este trabajo está compuesta básicamente de cuatro etapas principales: 1) el acopio y análisis de información que fundamente el proyecto, en congruencia con los principios internacionalmente aceptados del concepto de desarrollo sostenible; 2) propuesta de opciones viables para la solución de la problemática planteada y evaluación de las alternativas tecnológicas de la opción óptima; 3) desarrollo técnico de la opción seleccionada como óptima; y 4) la evaluación financiera del proyecto.

En la etapa de acopio y análisis de información se propone que se fundamente para el proyecto, los principios del concepto de desarrollo sostenible de protección del medio ambiente, la generación de riqueza, y la distribución equitativa de la misma dentro de la sociedad, es decir si se trata de un proyecto que va a generar desarrollo económico, socio-cultural y ambiental, tendiente a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, fundado en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección al ambiente y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, de manera que no comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.

Para la propuesta de opciones viables, se deberá considerar en primera instancia las opciones generales de solución a la problemática planteada, y posteriormente se deberán realizar la evaluación de las alternativas tecnológicas de la opción general seleccionada previamente. Con el caso de estudio del presente trabajo se plantean como opciones generales, la búsqueda de fuentes alternativas de agua potable para abastecer a la población a futuro. Esta opción, si bien mitiga el impacto de los altos índices de escasez de agua fresca en la región, no resuelve el problema asociado a la contaminación ambiental proveniente de la generación y disposición directa del agua residual generada a los cuerpos de agua.

Como segunda opción no excluyente de la primera, se planteó instalar y operar una planta de tratamiento de aguas residuales y retornar el agua tratada para recarga de los cuerpos naturales de agua. En tercera opción se encuentra la instalación y operación de una planta de tratamiento de aguas residuales y reutilización del agua tratada para actividades de riego y actividades industriales menores. Esta tercera opción es la que en mayor medida se acerca a los principios de desarrollo sostenible, y se consideró como la opción óptima para la cual se plantearon y evaluaron tres alternativas

tecnológicas, siendo éstas: lodos activados convencionales, *sequencing batch reactor SBR* (lodos activados en condiciones de estado no estacionario), y lodos activados con aireación extendida.

En la tercera etapa de la metodología propuesta, que consiste en el desarrollo técnico de la opción, se dimensionan los equipos principales de los que constará la planta de tratamiento de aguas residuales, para el tratamiento de 197 L/s por día. Dentro del desarrollo se dimensionó un tanque de lodos activados con sus correspondientes pretratamiento y etapas posteriores de sedimentación, desinfección y estabilización de lodos.

Finalmente, en la cuarta etapa se realizó un análisis financiero, llegándose a la conclusión de que con un costo de oportunidad del 12%, que es la rentabilidad exigida por el gobierno colombiano para asignar la financiación del proyecto, no era posible obtener una operación rentable de la planta de tratamiento. Lo anterior considerando únicamente los beneficios aportados por el ahorro representado en la disminución en el pago de las tasas retributivas por el vertimiento del agua residual. Se estimó entonces que era necesario un flujo de efectivo adicional de 2'424,730 dólares americanos por año. Dicho flujo de efectivo podría provenir de la tarifa cobrada al usuario por el servicio, de subsidios gubernamentales, o de organismos internacionales.

En el caso de optarse por cargar esta cantidad adicional de dinero a la tarifa pagada por el usuario, se presentaría un incremento cerca de los 0.38 dólares americanos por metro cúbico tratado de agua residual; esto representa un aumento del 110% en el valor de la tarifa base del servicio de acueducto y alcantarillado. Dicha medida tendría un enorme impacto social, tratándose de una *región en desarrollo*, y estaría sujeta a un estudio previo de la capacidad de pago de los pobladores de la ciudad beneficiada, en este caso el municipio de Tunja.

## **CONTRIBUCIÓN A LA SUSTENTABILIDAD DE LA REGIÓN**

Se puede entender el desarrollo sostenible como la consecuencia de tres efectos estrechamente relacionados a saber: un desarrollo económico sostenible, una sustentabilidad social y la preservación de la naturaleza.

En la medida en que estos tres efectos se expresen con mayor intensidad, se presentan las condiciones para hacer realidad la idea del desarrollo sostenible. De la misma manera, los planes, proyectos, acciones y políticas que contribuyan al logro y aumento cualitativo y cuantitativo de dichos efectos, estarán contribuyendo a la consecución de un desarrollo sostenible de la región.

El desarrollo de un proyecto para el tratamiento de las aguas residuales generadas por una población, genera efectos (diferentes pero relacionados unos con otros) que en conjunción estimulan el logro de dicho desarrollo.

La operación adecuada de una planta de tratamiento de aguas residuales repercute entre otras muchas cosas en un aumento en el turismo regional, aumento en el número de actividades económicas y productividad de la región, lo que impulsa directamente el aumento en la relación dinero por habitante. Adicionalmente, el aspecto del desarrollo económico del departamento también se fortalece en la medida en que aumenta la cobertura y la calidad de los servicios de educación y salud, siendo éste último estimulado por la reducción en la atención hospitalaria de enfermedades infecciosas (p.e. epidemias de cólera), provenientes del contacto directo o consumo de aguas residuales no tratadas.

Por otro lado, el aumento de la eficiencia y productividad agrícola de la región, el aumento en la seguridad alimentaria de la población y el mejoramiento de la calidad de vida, resultado del mejoramiento de las condiciones ambientales de la cuenca alta del río Chicamocha, eje del desarrollo agrícola del departamento, permiten alcanzar una reducción del hambre y la pobreza en la comunidad, aspecto fundamental para generar la sustentabilidad social requerida por el desarrollo sostenible.

Finalmente, el desarrollo de un proyecto que proporcione las instalaciones necesarias para el tratamiento del agua residual producida en la ciudad de Tunja, que disminuyan el nivel de contaminación del río Chicamocha, que estimulen el aumento en la capacidad de absorción de desechos en el entorno comprendido por la cuenca alta del río y que permita un incremento en la capacidad de regeneración del recurso natural a lo largo del río, va a conducir hacia un uso más racional de los recursos naturales de la región, aportando de esta manera a una mejor preservación de la naturaleza en la que se encuentra inmersa la sociedad boyacense.

## **CONCLUSIÓN GENERAL**

La formulación de un proyecto, siguiendo la metodología desarrollada en esta tesis, brinda un panorama de los requerimientos hídricos de una de las regiones del país que presenta, desde tiempo atrás, graves ausencias en la disponibilidad de agua fresca. Este trabajo que, aunque no es su fin último, es un aporte a los diferentes esfuerzos realizados en el país por atraer la atención, tanto de las instituciones ambientales como gubernamentales, al desarrollo de programas y proyectos que mejoren las condiciones de vida de la comunidad, que estimulen el desarrollo de actividades productivas y que protejan el medio ambiente, en los municipios del corredor industrial del departamento.

Si bien existe la voluntad política en Colombia y la estructura institucional para desarrollar proyectos ambientales, no son suficientes por sí mismas para alcanzar las condiciones ambientales, socio-económicas y culturales, que permitan contar con las condiciones requeridas para el desarrollo sostenible en el país. Por lo tanto, es necesario que a la par del desarrollo de directrices ambientales y políticas de desarrollo, se continúe proporcionando e implementando por parte del gobierno colombiano, instrumentos que permitan la adecuada gestión de las diferentes etapas del desarrollo de sistemas de saneamiento básico, especialmente en el tratamiento de aguas residuales. Surge entonces, como consecuencia del desarrollo de las directrices nacionales e internacionales de recuperación y protección del medio ambiente, la necesidad de formular proyectos ambientales que tomen en cuenta además de los aspectos económicos y técnicos, aquellos que contribuyan al desarrollo sostenible del entorno en el que se han de desarrollar los proyectos propuestos.

La formulación del proyecto, como resultado del proceso previo de identificación de necesidades y definición de soluciones particulares, se ve sustentada de manera más consistente y viable por alternativas congruentes con las necesidades socioeconómicas y ambientales del entorno, a través del desarrollo de una metodología como la propuesta en este trabajo. Esta metodología permite ofrecer un panorama general, anterior a la estructuración detallada del proyecto, del orden de magnitud tanto del desarrollo técnico como del requerimiento financiero y los impactos globales del mismo, aspectos que aunados a la experiencia y buen criterio del equipo proyectista,

contribuyen a desarrollar una propuesta con más oportunidades de éxito y mayores impactos positivos en la sociedad, economía y medio ambiente.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1. ESTRUCTURA DEL SISTEMA NACIONAL AMBIENTAL SINA EN COLOMBIA



La creación del SINA es consecuente con la recomendación hecha en la Declaración de Río de Janeiro de junio de 1992, sobre la consecución de una capacidad propia de desarrollo sostenible por parte de los estados, a través de estrategias como el aumento del saber científico, soportado en el intercambio de conocimientos, la adaptación y la transferencia de tecnologías.

El SINA integra los principios y orientaciones generales contenidos en la Ley, normatividad, entidades responsables del desarrollo de la política ambiental, fuentes y recursos económicos para el manejo y la recuperación del medio ambiente, organizaciones relacionadas con la problemática ambiental y aquellas entidades que realizan actividades de producción de información, investigación científica y desarrollo tecnológico en el campo ambiental.

## ANEXO 2. CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA Y SALIDA DEL AGUA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE TUNJA

Las concentraciones de los parámetros empleados para el diseño de las unidades de tratamiento del agua residual de entrada se presentan en la tabla 1 de éste anexo. En la tabla 2 se muestran las concentraciones del agua tratada a las que se puede llegar, después de aplicar los porcentajes típicos de remoción para las unidades propuestas del tren de tratamiento de aguas residuales.

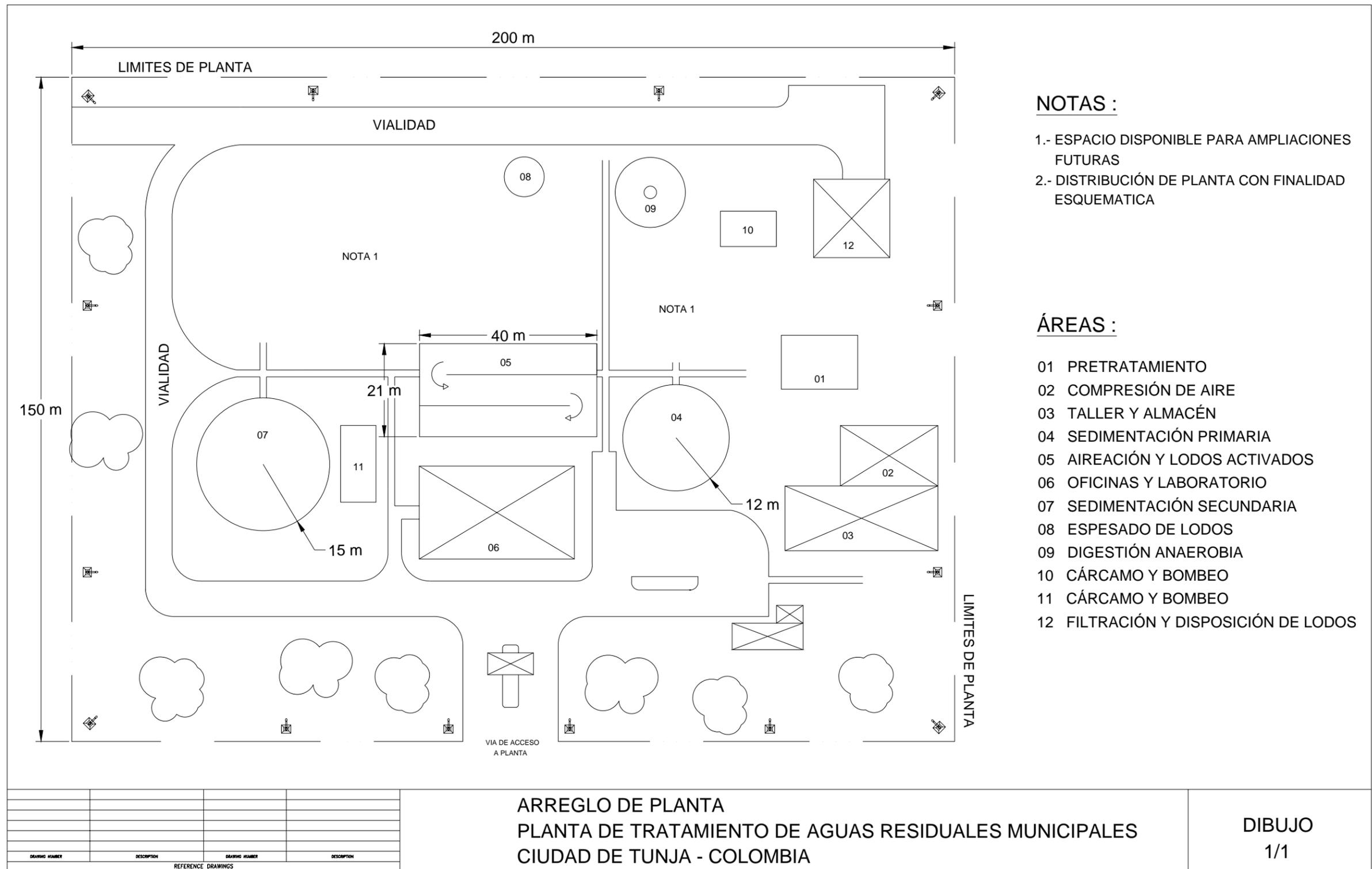
**Tabla 1 Anexo. Características de entrada del agua residual**

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	VALOR
CAUDAL DE AGUA RESIDUAL	m <sup>3</sup> /d	17,020
MATERIA ORGÁNICA DBO <sub>5</sub>	mg/L	385
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	mg/L	528
FÓSFORO	mg/L	12.3
NITRÓGENO ORGÁNICO	mg/L	92.0
NITRÓGENO NH <sub>3</sub>	mg/L	76.6

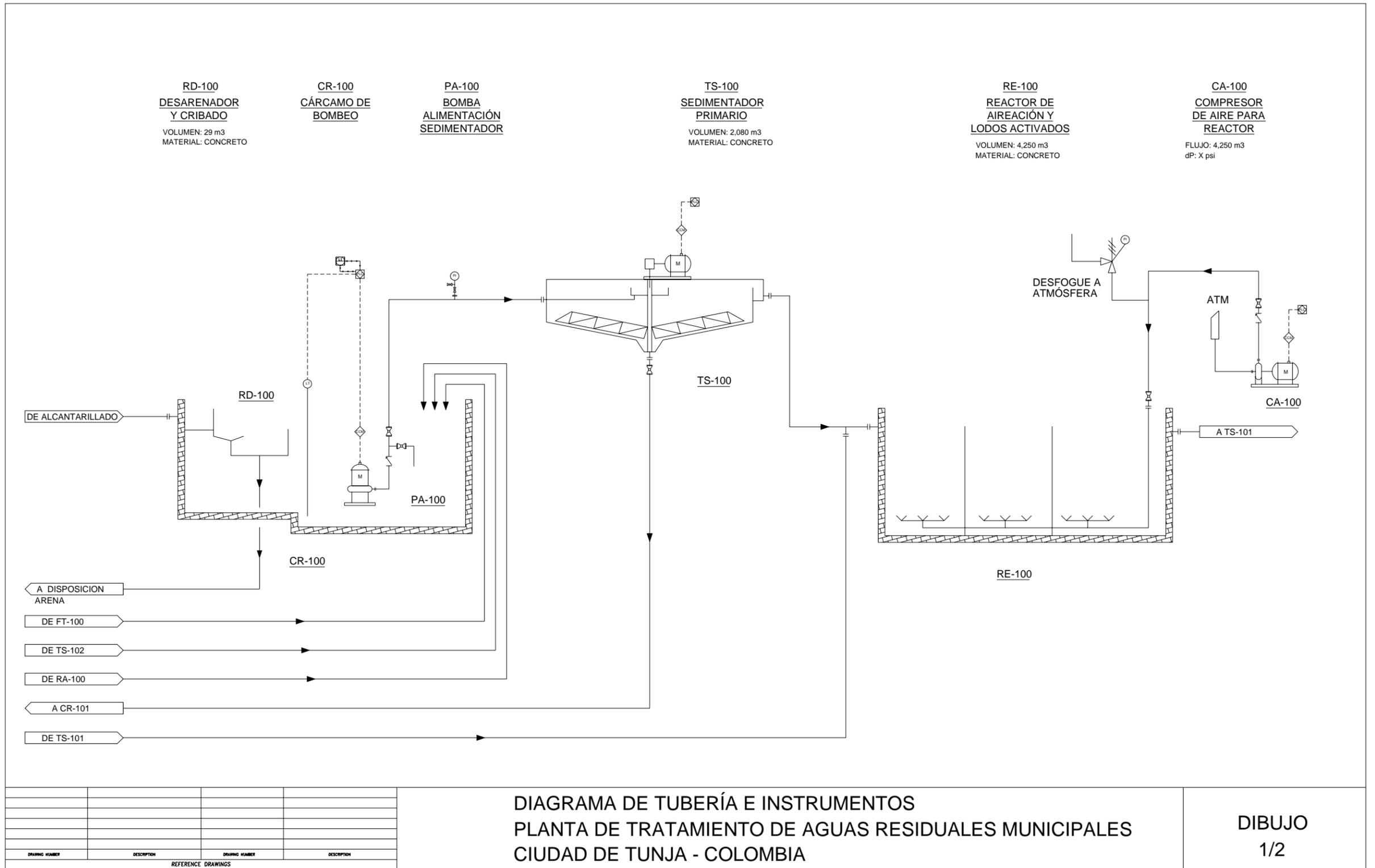
**Tabla 2 Anexo. Características de salida del agua producto del tratamiento**

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	VALOR
CAUDAL DE AGUA TRATADA	m <sup>3</sup> /d	17,000
MATERIA ORGÁNICA DBO <sub>5</sub>	mg/L	30
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	mg/L	30
FÓSFORO	mg/L	8.5
NITRÓGENO ORGÁNICO	mg/L	66.5
NITRÓGENO NH <sub>3</sub>	mg/L	65.1

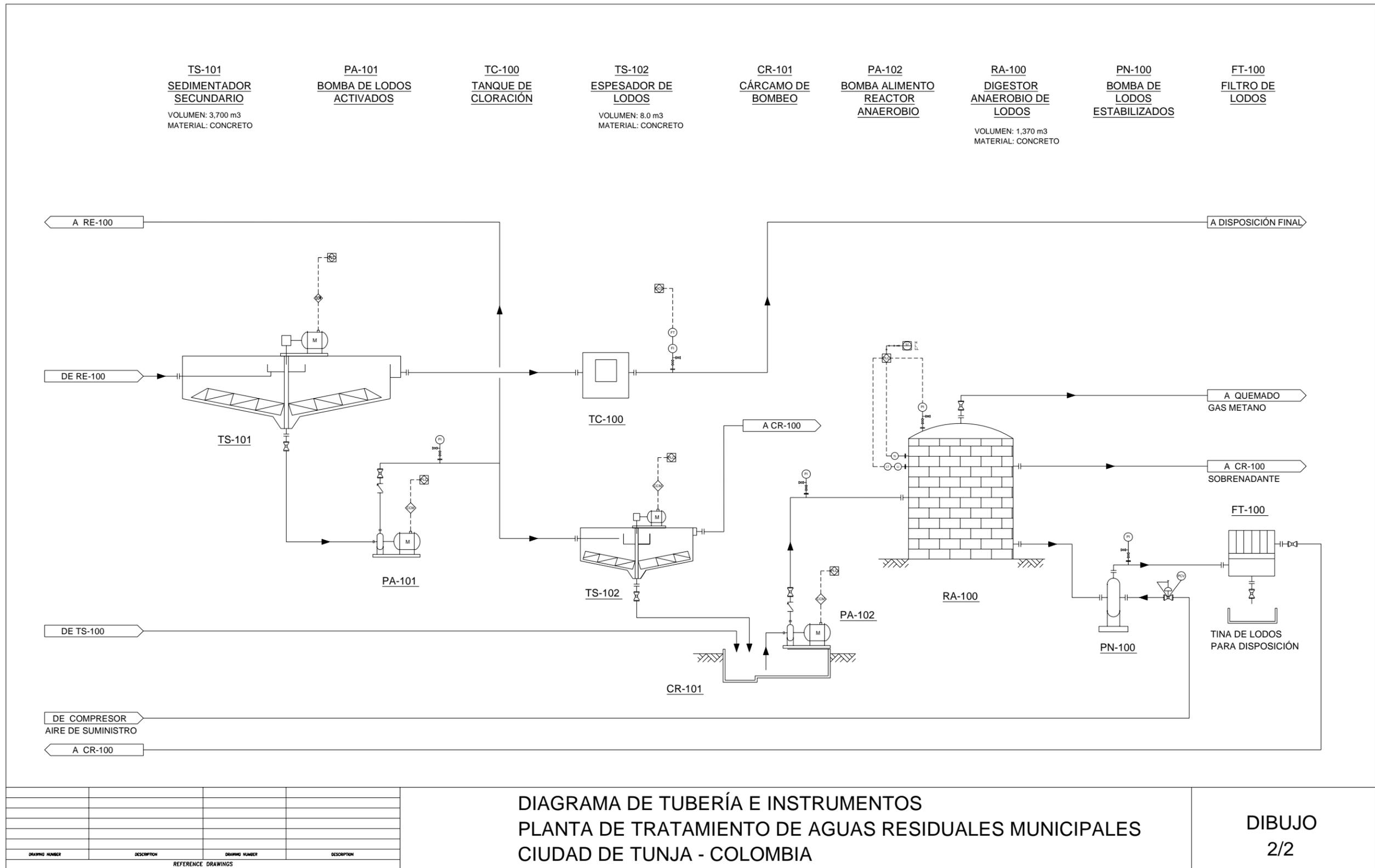
**ANEXO 3. ARREGLO DE PLANTA. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE TUNJA – COLOMBIA.**



**ANEXO 4. DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTOS. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE TUNJA – COLOMBIA.**



**ANEXO 4. DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTOS. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE TUNJA – COLOMBIA.**



**DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTOS  
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES  
CIUDAD DE TUNJA - COLOMBIA**

**DIBUJO  
2/2**

DRWG NO	DESCRIPTION	DRWG NO	DESCRIPTION

## ANEXO 5. NORMA COLOMBIANA DE VERTIMIENTO PARA DESCARGAS ORGÁNICAS SEGÚN DECRETO 1594/84

En el Decreto 1594/84 se considera el cumplimiento de las normas nacionales sobre vertimientos. Estas requieren que se remueva un porcentaje definido de carga orgánica y de sólidos suspendidos, y hace una diferencia entre los usuarios nuevos y los existentes en la fecha de expedición del Decreto. En la siguiente tabla se presentan los criterios que se establecen para toda descarga al alcantarillado, en donde se limitan las descargas de carga orgánica, de sólidos suspendidos, la concentración de aceites y grasas y el rango apropiado de pH.

**Tabla 3 Anexo. Norma de vertimiento para descargas orgánicas para Colombia**

CARACTERÍSTICA	DESCARGA A UN ALCANTARILLADO	DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA
pH	5 a 9 unidades	5 a 9 unidades
Temperatura	Máximo 40°C	Máximo 40°C
Grasas y Aceites	Remoción 80% máximo 100 mg/L	Remoción 80%
Sólidos Suspendidos	Remoción 80% nuevo Remoción 50% usuario existente	Remoción 80% nuevo Remoción 50% usuario existente
DBO en desechos doméstico	Remoción 80% nuevo Remoción 30% usuario existente	Remoción 80% nuevo Remoción 30% usuario existente
DBO en desechos industriales	Remoción 80% nuevo Remoción 20% usuario existente	Remoción 80% nuevo Remoción 20% usuario existente
Caudal máximo	1.5 veces caudal promedio horario	-

## ANEXO 6. FUNDAMENTOS DE LA CALIFICACIÓN EN EL CASO DE ESTUDIO

### EVALUACIÓN DE LOS ASPECTOS TÉCNICOS DE PROCESO

Dentro de los aspectos técnicos del proceso, fueron seleccionados los siguientes a ser evaluados. Los resultados se presentan a continuación.

- Intervalo de carga orgánica
- Porcentaje de remoción de DBO
- Consumo de agentes químicos
- Producción de lodos
- Generación de olores
- Grado de capacitación de operarios
- Variabilidad de caudal
- Variabilidad de calidad de agua
- Tiempos de residencia

Tabla 4 Anexo. Evaluación de los aspectos técnicos de proceso

SUBASPECTO Y/O FACTOR	TECNOLOGÍAS		
	LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL	SEQUENCING BATCH REACTOR	AIREACIÓN EXTENDIDA
INTERVALO DE CARGA ORGÁNICA (mg/l DE DBO)	160 - 640	160 - 400	160 - 400
PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE DBO	85 - 95	85 - 95	90 - 95
AGENTES QUÍMICOS	COLORO	Puede alcanzar resultados excelentes sin la adicción de reactivos químicos. Se utiliza cloro para desinfectar al agua.	COLORO
PRODUCCIÓN DE LODOS	MUY ALTA	MEDIA	BAJA
GENERACIÓN DE OLORES	ALTA, si no se mantienen condiciones de operación óptimas se puede generar condiciones sépticas y propiciar malos olores	MEDIA	BAJA
GRADO DE CAPACITACIÓN DE PERSONAL OPERATIVO	No se requieren operadores con una capacitación amplia	Se requieren operadores calificados	No se requieren operadores con una capacitación amplia
VARIABILIDAD DE CAUDAL	El proceso está sujeto a descontroles	Puede manejar cambios considerables de volumen	Los grandes tiempos de residencia proveen al sistema igualación, logrando de ésta manera absorber los impactos repentinos o temporales.
VARIABILIDAD DE CALIDAD DE AGUA	SENSIBLE	SIN SENSIBILIDAD	MÍNIMA SENSIBILIDAD
TIEMPOS DE RESIDENCIA	6 - 12 dependiendo el tipo de aireación	3 - 5	8 - 35

## EVALUACIÓN DE LOS ASPECTOS TÉCNICOS COMPLEMENTARIOS

Dentro de los aspectos técnicos complementarios fueron seleccionados los siguientes para ser evaluados, mientras que los resultados se presentan en la siguiente tabla:

- Campo de aplicación
- Nivel de automatización
- Sensibilidad a interrupciones
- Inclusión de otros procesos

**Tabla 5 Anexo. Evaluación de los aspectos técnicos complementarios**

SUBASPECTO Y/O FACTOR	TECNOLOGÍAS		
	LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL	SEQUENCING BATCH REACTOR	AIREACIÓN EXTENDIDA
CAMPOS DE APLICACIÓN	Agua municipal	Agua municipal Agua residual industrial	Agua municipal Agua residual industrial
NIVEL DE AUTOMATIZACIÓN	MÍNIMA	INDISPENSABLE	OPCIONAL
SENSIBILIDAD A INTERRUPTIONES	No presenta problemas significativos	No presenta problemas significativos	No presenta problemas significativos
INCLUSIÓN DE OTROS PROCESOS	NINGUNA	Nitrificación/desnitrificación/nitrificación	Nitrificación/desnitrificación

## EVALUACIÓN DE LOS ASPECTOS ECONÓMICO-FINANCIEROS

Dentro de los aspectos económicos-financieros fueron seleccionados los siguientes para ser evaluados, y los resultados se presentan en la tabla siguiente:

- Inversión
- Costos de operación
- Costos de mantenimiento
- Requerimientos de energía
- Plantilla laboral de operación

**Tabla 6 Anexo. Evaluación de los aspectos económico-financieros**

SUBASPECTO Y/O FACTOR	TECNOLOGÍAS		
	LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL	SEQUENCING BATCH REACTOR	AIREACIÓN EXTENDIDA
INVERSIÓN	MEDIA	ALTA	ALTA
COSTOS DE OPERACIÓN	ALTA	BAJA	ALTA
COSTOS DE MANTENIMIENTO	ALTA	ALTA	CONSIDERABLEMENTE ALTA
REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA	MEDIA	ALTA	MEDIA
PLANTILLA LABORAL DE OPERACIÓN	BAJA	BAJA	MEDIA

## EVALUACIÓN DE LOS ASPECTOS ESTRATÉGICO-TÁCTICOS

Dentro de los aspectos estratégico-tácticos fueron seleccionados los siguientes para ser evaluados:

- Área superficial
- Obra civil
- Reparación *in situ*
- Disponibilidad de refacciones

**Tabla 7 Anexo. Evaluación de los aspectos estratégico-tácticos**

SUBASPECTO Y/O FACTOR	TECNOLOGÍAS		
	LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL	SEQUENCING BATCH REACTOR	AIREACIÓN EXTENDIDA
ÁREA SUPERFICIAL	MEDIA	MEDIA	ALTA
OBRA CIVIL	No requiere de edificaciones complejas	Se requiere de la construcción de tanques con conexión interna	Se necesita construir estanques grandes, pero no presenta dificultad
REPARACIÓN <i>IN SITU</i>	SI	SI	SI
DISPONIBILIDAD DE REFACCIONES	De adquisición nacional	De adquisición nacional	De adquisición nacional

## VENTAJAS, DESVENTAJAS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

**Tabla 8 Anexo. Descripción general de las ventajas, desventajas y características de las alternativas tecnológicas**

SISTEMA	VENTAJAS	DESVENTAJAS	CARACTERÍSTICAS
<b>LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL</b>	<p>Requiere tiempos de residencia menores que para aireación extendida (6-8 horas con aireación por difusión). (9 – 12 horas con aireación mecánica). Confiabilidad muy buena en ausencia de cargas de choque.</p> <p>Reduce de 85 a 95 % la DBO<sub>5</sub>.</p>	<p>Costos de inversión, operación y mantenimiento altos.</p> <p>Sujeto a descontrol por cargas orgánicas de choque.</p> <p>Requerimientos de energía altos.</p> <p>Produce grandes cantidades de lodo para disposición.</p> <p>Requiere clarificador primario.</p> <p>Requiere tratamiento de lodos primarios.</p>	<p>Es el proceso más común, usado por municipios e industrias a nivel mundial; opera en fase endógena con objeto de producir un efluente aceptable en DBO.</p>
<b>LODOS ACTIVADOS CON AIREACIÓN EXTENDIDA</b>	<p>Produce bajo volumen de lodos ya que la producción neta de sólidos en exceso se minimiza.</p> <p>Los altos tiempos de residencia en el tanque de aireación proveen igualación, para absorber cargas de choque temporales/repentinas.</p> <p>Generalmente no se usa la clarificación primaria.</p> <p>Reduce de 90 a 95 % la DBO<sub>5</sub>.</p> <p>Es más fácil de controlar que el proceso de lodos activados.</p>	<p>Costos de inversión, operación y mantenimiento mayores que para el proceso convencional (fosas más grandes y más aire).</p> <p>Requiere tiempos de residencia altos (18 a 35 horas) para la aireación y reducción de los niveles de DBO.</p> <p>Requiere cargas orgánicas bajas para conducir a los microorganismos a respiración endógena y metabolizar el material citoplásmico de sus semejantes.</p> <p>Se requiere aproximadamente el doble de oxígeno que para el proceso de lodos activados convencional.</p> <p>Produce un efluente con sólidos suspendidos relativamente altos cuando los rangos de sedimentación natural óptimos se exceden.</p> <p>Los tanques de sedimentación para aireación extendida requieren de mayores tiempo de residencia que para el proceso convencional (4 hrs. vs. 2 hrs.).</p> <p>Debido a que la carga orgánica es baja y se suministra un exceso grande de aire, puede ocurrir nitrificación en un grado apreciable involucrando la conversión de nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato. Un problema relacionado a la nitrificación es una caída en pH en el sistema debido a la formación de ácido nítrico. El pH puede disminuir hasta 4.5 en cuyo caso el proceso biológico puede afectarse negativamente.</p>	<p>Las fosas de oxidación es una modificación del sistema biológico de tratamiento de lodos activados que utiliza un tiempo extenso de retención de sólidos.</p> <p>Las fosas de oxidación constituyen una de las versiones ampliamente aplicadas a tratamiento de aguas residuales Canal de forma oval provista de aireación.</p> <p>Las plantas de aireación extendida toman la forma de una fosa de oxidación empleando aireación mecánica y algunas veces aireación por difusión en conjunto con mezcladores mecánicos.</p> <p>La aireación extendida es un sistema de lodos activados que opera en fase de respiración endógena (limitación de comida) y se caracteriza por altos tiempos de retención hidráulica y de lodos, así como altos niveles de sólidos suspendidos en el licor mezclado.</p>
<b>REACTORES SECUENCIALES POR LOTES.</b>	<p>Igualación, clarificación primaria, tratamiento biológico y clarificación secundaria se pueden efectuar en un solo reactor.</p> <p>Flexibilidad en la operación y control, requerimientos mínimos de área. Ahorros potenciales en los costos de capital al eliminar los clarificadores y otros equipos.</p> <p>Un sistema SBR (Sequencing Batch Reactor) puede ser operado para alcanzar nitrificación, desnitrificación y remoción de nutrientes sin adición de reactivos químicos.</p>	<p>Se requiere un nivel de sofisticación superior en comparación a los sistemas convencionales, especialmente para sistemas grandes, de unidades de temporización y controles.</p> <p>Niveles superiores de mantenimiento en comparación con los sistemas convencionales asociados con controles más sofisticados, interruptores automáticos y válvulas automáticas.</p> <p>Taponamiento potencial de los dispositivos de aireación.</p>	<p>El reactor por lotes secuencial (Sequencing Batch Reactor o SBR) es un sistema de lodos activados de llenado y extracción para el tratamiento de aguas. En este sistema el agua se adiciona a un reactor por lotes, se trata para remover componentes indeseables, y después se descarga.</p> <p>La igualación, aireación, y clarificación se pueden efectuar usando un solo reactor por lotes. Para optimizar el funcionamiento del sistema se usan dos o más reactores por lotes</p> <p>Es una secuencia predeterminada de operaciones. El sistema ha sido exitosamente usado para tratar tanto agua municipal como industrial. Son únicamente adecuados para flujos bajos o intermitentes . Una versión modificada es el sistema de aireación extendida cíclica en donde el agua fluye continuamente al reactor. Como tal, no es un reactor por lotes.</p>

## ANEXO 7. SIMBOLOGÍA EMPLEADA EN LOS CÁLCULOS DE DISEÑO DE EQUIPO

$A$ : area	$S_o$ : Concentracion de $DBO_5$ en el afluente del reactor de aireacion
$Anch$ : ancho	$SV_{destr}$ : masa de solidos volatiles destruidos
$A_t$ : flujo volumetrico de aire teorico	$SV_{digestor}$ : flujo masico de solidos volatiles que entran al reactor
$A_r$ : flujo volumetrico de aire necesario real	$t_r$ : tiempo de detencion o retencion
$C_v$ : carga volumetrica	$TDS$ : tasa de desbordamiento superficial
$d$ : diametro	$TMC$ : tasa masica de carga
$E_s$ : eficiencia	$V$ : volumen
$F/M$ : relacion $DBO_5$ soluble alimentada y solidos suspendidos volatiles en el reactor	$V'$ : volumen con sobrediseño
$h$ : profundidad	$V_r$ : volumen del reactor de aireacion
$h_{min}$ : profundidad minima	$V_s$ : velocidad
$kd$ : coeficiente $kd$	$X$ : Concentracion de solidos suspendidos en el licor de mezcla
$Long$ : longitud	$Y$ : relacion masa de solidos suspendidos volatiles y masa de $DBO_5$
$m_e X$ : flujo masico de $X$ en el efluente	$Y_{osb}$ : coeficiente $Y$ observado
$m_p$ : flujo masico de solidos suspendidos purgados	$\alpha$ : relacion de recirculacion
$P_x$ : masa total de fango a retirar por dia	$\theta_c$ : tiempo de retencion celular
$Q_f$ : flujo volumetrico de fango	$\theta_{rh}$ : tiempo de retencion hidraulica
$Q_{gas}$ : flujo volumetrico de gas producido	$[DBO_5]$ : concentracion de $DBO_5$
$Q_p$ : flujo volumetrico de fango activado purgado	$[SS]$ : concentracion de Solidos Suspendidos
$Q_x$ : flujo volumetrico de $X$	
$S$ : Concentracion de $DBO_5$ en el efluente del reactor de aireacion	

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL-SRH-OMM, *O Estado das águas no Brasil. Perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos*, Agencia Nacional de Energía Eléctrica, Secretaria de Recursos Hídricos, Organización Meteorológica Mundial, Brasilia D.F., 1999.
- [2] BANCO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA, *Información económica. Informes estadísticos. Tasas de colocación y captación, Tasa representativa del mercado TMR*, /www.banrep.gov.co/, junio de 2004.
- [3] BISOGNI J. J. & LAWRENCE A. W., *Relationships Between Biological Solids Retention Time and Settling Characteristics*, Water Res. 5, 753, 1971.
- [4] CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE CEPIS, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD OPS, ORGANIZACIÓN MUNDIAL PARA LA SALUD OMS, *Evaluación de los servicios de agua potable y saneamiento en las américas. Colombia*, 2000.
- [5] CONIL Philippe, *Las plantas de tratamiento de aguas residuales(PTAR): unas herramientas de desarrollo local*. Conferencia presentada en el taller "Nuevas opciones de saneamiento en países en desarrollo: contribuciones recientes en América Latina", Ciudad de México, 1998.
- [6] CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL, *Acciones Prioritarias y Lineamientos para la Formulación del Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales*, Documento CONPES 3177, Departamento Nacional de Planeación. República de Colombia, Bogotá, D.C., 15 de julio de 2002.
- [7] CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ CORPOBOYACÁ, *Informe ejecutivo de calidad hídrica e implementación tasas retributivas por vertimientos hídricos puntuales*, Colombia, mayo 2003.
- [8] CRITES R., TCHOBANOGLIOUS G., *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*, McGraw-Hill Interamericana S.A., Santafé de Bogotá, 2000.
- [9] DAVIS & CORNWELL, *Introduction to environmental engineering*, 4a edición, editorial Prentice Hall Inc., Ohio, 1991.
- [10] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DANE, *Población y tasas de crecimiento media anual, según departamentos. 1999 y 1995 – 2015*, Colombia.
- [11] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, *Lineamientos de política para un plan de desarrollo sectorial de agua potable y saneamiento básico y ambiental*, Bogotá D.C., octubre de 2004.
- [12] DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO Y AMBIENTAL, *Gestión Integral del Agua*, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, Bogotá, 2004.
- [13] ECKENFELDER W., PATOCZKA J. y WATKIN A., *Wastewater treatment*, Chemical Engineering, pgs. 64-74, Septiembre 2 de 1985.

- [14] ECOS DE ECONOMÍA No. 18, *Saneamiento hídrico en Colombia: instituciones y situación actual*, Medellín, abril 2004.
- [15] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Preliminary Treatment Facilities – Design and Operational Consideration*, U.S. EPA-430/09-87-007, Washington D.C., 1987.
- [16] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Process Design Manual for Sludge Treatment Disposal*, U.S. EPA 625/1-79-11, U.S., 1979
- [17] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Process Design Manual for Suspended Solids Removal*, U.S. EPA 625/1-75-003a, Washington D.C., 1975
- [18] FAIR G. N. *et al.*, *Water and Wastewater Engineering*, vol.2, John Wiley and Sons, New York, 1968.
- [19] GRADY C. P. L & LIM H. C., *Biological Wastewater Treatment – Theory and Applications*, Marcel Dekker Inc. New York, 1980.
- [20] FORREST D. C., A.B. LORENZONI, *Applied cost engineering*, editorial Marcel Dekeer Inc., USA, 1978.
- [21] INFORMACIÓN TÉCNICA 2001, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico de Colombia.
- [22] INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO IMP y PETRÓLEOS MEXICANOS PEMEX, *Evaluación de Tecnologías en la Industria de Refinación del Petróleo*, IMP Subdirección de Transformación Industrial, PEMEX Refinación Subdirección de Producción, México, 1998.
- [23] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM), *Estudio nacional del agua. Balance hídrico y relación demanda-oferta en Colombia*, Santafé de Bogotá. 1998.
- [24] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, *Proyecto estado de la región 1999*, Colombia, 1998.
- [25] METCALF & EDDY Inc., *Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*, 2ª edición, editorial Labor S.A., Barcelona, 1985.
- [26] METCALF & EDDY Inc., *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*, 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw-Hill Inc., New York, 1991.
- [27] MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, *Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000: Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS*, Bogotá, 2000.
- [28] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL DE COLOMBIA, *Diagnóstico e inventario de los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales*, diciembre de 1998.
- [29] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL DE COLOMBIA, *Guía Ambiental para Sistemas de Alcantarillado y Plantas de Tratamiento*, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia.
- [30] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL DE COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, *Estudio Nacional del Agua 2000*, Bogotá.

- [31] LAWRENCE A. W. & McCARTY P. L., *Unified Basis for Biological Design and Operation*, Journal of the Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 96, 757, 1970.
- [32] ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD OPS, *Análisis del sector agua potable y saneamiento en Colombia*, 1997.
- [33] PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE PNUMA, *Global Environment Outlook. América Latina y el Caribe. Perspectivas del medio ambiente 2000*, México D.F, México.
- [34] PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE STANDARDS COMMITTEE, *A guide to the project management body of knowledge*, PMI Publishing Division, 1996 edition, USA.
- [35] REYES P. *et al.* *El páramo. Ecosistema de Alta montaña*, Banco de la República. Biblioteca Luis Ángel Arango. Biblioteca virtual, Colombia 2004.
- [36] REYNOLDS K. A., *Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica*, Universidad de Arizona, Estados Unidos, septiembre 2002.
- [37] SARMIENTO G., *Manejo de aguas residuales urbanas y tasas retributivas*, Ministerio de Desarrollo Colombia, junio de 1997.
- [38] STEEL W. E., *Water Supply and Sewerage*, McGraw-Hill Inc., New York, 1979.
- [39] SUNSTROM D. W., & KLEI H. E., *Wastewater Treatment*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1979.
- [40] THE WORLD BANK, *Social indicators of development 1996*, Washington D.C, 1996.
- [41] THE WORLD BANK, *World development report: the state in a changing world*, Oxford University Press, Oxford, and New York, 1997.
- [42] THE WORLD BANK. *Water and sanitation program. 1999 – 2000 Report*, Lima.
- [43] THE WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION WMO y otros, *Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world*, WMO, Geneva, 1997, UNEP, 1999.
- [44] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME UNEP/ISRIC (International Soil Reference and Information Centre), *World map of the status of human-induced soil degradation*. Second edition, UNEP, Nairobi, Kenya, and ISRIC, Wageningen, Netherlands, 1991.
- [45] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, *Caribbean environment outlook*, 1999.
- [46] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, *Global Environment Outlook 2000*, 1999.
- [47] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, *Global Environment Outlook 3. Fact sheet. Past and present: 1972 to 2002*.
- [48] UNITED STATES ARMY TECH. Manual No. 5-814-3, *Domestic Wastewater Treatment*, St. Louis, Mo., 1978.

- [49] UNITED STATES NAVAL FACILITIES Design Manual No. 5.8, *Civil Engineering Pollution Control Systems*, Philadelphia, Pa., 1979.
- [50] VEIGA, M. M., *Introducing new technologies for abatement of global mercury pollution in Latin America*, Rio de Janeiro, 1997.
- [51] WATER ENVIRONMENT FEDERATION Manual of Practice No. 8, y AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS Manual and Report on Engineering Practice No. 76, *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, vol. I, 2<sup>nd</sup> edition, USA, 1992.
- [52] WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION Manual of Practice No. 8, *Wastewater Treatment Plant Design*, Alexandria, Va., 1982.
- [53] WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, *Wastewater Treatment Plant Survey*, Alexandria, Va., 1989.
- [54] WRI, UNEP y UNDP, *World resources 1994–1995*, Oxford University Press, New York and Oxford, 1994.