

SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO



MINISTERIO DE ASUNTOS EXTERIORES, UNIÓN EUROPEA Y COOPERACIÓN



FCAS Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento



MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS

© AECID 2022

Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo

*Av. Reyes Católicos, 4
28040 Madrid, Spain
Teléfono: +34 91 583 81 00
www.aecid.es*

Catálogo General de Publicaciones Oficiales: <https://cpage.mpr.gob.es>

Esta publicación ha sido posible gracias a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). El contenido de la misma no refleja necesariamente la postura de la AECID.

NIPO en línea: 109-22-078-3

Dirección y Coordinación:

Coordinación por parte de la AECID: Yasmina Ferrer Medina. Departamento del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento.

Esta publicación ha sido elaborada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) por encargo de la AECID. Autoría por parte del CEDEX: Ignacio del Río Marrero y Carlos López Monllor. Área de Tecnología del Agua del Centro de Estudios Hidrográficos.

Diseño original y maquetación:

CEDEX

Email:

dfcas@aecid.es

Fotografía de la portada: Planta de tratamiento de Los Arcos (Navarra, España). Por cortesía de NILSA.

CONTENIDOS

GLOSARIO	VI
1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETO Y APLICACIÓN DE ESTA GUÍA	4
3 CONTEXTO DEL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	7
3.1 PLANES DE DESARROLLO SECTORIAL	7
3.2 PLANES O ESTRATEGIAS DE CARÁCTER REGIONAL	8
3.3 PROYECTOS DE SANEAMIENTO Y TRATAMIENTO	10
3.4 EL PLAN DIRECTOR DE SANEAMIENTO Y TRATAMIENTO	11
3.5 RELACIÓN DEL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO CON OTROS ESTUDIOS	14
4 ASPECTOS BÁSICOS DEL ANÁLISIS DE DECISIÓN MULTICRITERIO	17
4.1 GENERALIDADES	17
4.2 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS MULTICRITERIO	19
4.3 TAREAS EN EL DESARROLLO DE UN ANÁLISIS MULTICRITERIO	22
4.3.1 ESTABLECIMIENTO DEL CONTEXTO DE LA DECISIÓN A ADOPTAR	22
4.3.2 DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL ANÁLISIS	23
4.3.3 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN SOBRE LAS ALTERNATIVAS	24
4.3.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE DECISIÓN	24
4.3.5 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
5 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE TRATAMIENTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES	35
5.1 CONTEXTO DE LA DECISIÓN A ADOPTAR	35
5.2 ELEMENTOS DEL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS	38
5.2.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO	39
5.2.2 CONDICIONANTES LOCALES	42
5.2.3 ALTERNATIVAS A VALORAR	44
5.2.4 INCERTIDUMBRES Y RIESGOS	45
5.3 OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN NECESARIA	46
5.4 PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE DECISIÓN	46
5.5 ESTUDIO DE CRITERIOS	48
5.5.1 CRITERIOS LIMITANTES	49
5.5.2 CRITERIOS DE VALORACIÓN	50
5.6 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS A VALORAR	55
5.7 PONDERACIÓN DE CRITERIOS	58
5.7.1 PARTICIPACIÓN DE LOS AGENTES INTERESADOS	59
5.7.2 INCERTIDUMBRE EN LA PONDERACIÓN	62
5.7.3 MÉTODOS DE APOYO EN LA PONDERACIÓN	63
5.8 SISTEMAS DE PUNTUACIÓN DE CADA CRITERIO	64
5.8.1 SISTEMAS DE PUNTUACIÓN DE LOS ATRIBUTOS	65
5.8.2 EVALUACIÓN DE CADA CRITERIO GENERAL A PARTIR DE LOS FACTORES INTERNOS	67

5.9	PROPUESTA DE ALGORITMO DE INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN	68
5.10	OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS FINALES	68
5.10.1	REALIZACIÓN DE LOS CÁLCULOS DE PUNTUACIÓN	68
5.10.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	70
5.10.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	71
6	ANÁLISIS DE LOS CRITERIOS MÁS HABITUALES.	74
6.1	CONDICIONANTES DEL TRATAMIENTO	75
6.1.1	CALIDAD REQUERIDA DEL EFLUENTE	75
6.1.2	CALIDAD REQUERIDA EN EL LODO	78
6.1.3	CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL A TRATAR	78
6.1.4	VARIABLES AMBIENTALES	83
6.2	CONDICIONANTES DE LA CONSTRUCCIÓN	84
6.2.1	CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO	84
6.2.2	DISPONIBILIDAD DE MATERIALES Y EQUIPOS	87
6.3	SOSTENIBILIDAD TÉCNICA	87
6.3.1	COMPLEJIDAD DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (CAPACIDAD DEL OPERADOR)	88
6.3.2	ACCESIBILIDAD A EQUIPOS DE REPUESTO Y A MANTENIMIENTO ESPECIALIZADO	90
6.4	SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA	92
6.4.1	COSTOS DE CONSTRUCCIÓN	94
6.4.2	COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	97
6.5	SOSTENIBILIDAD SOCIAL	100
6.5.1	ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA POBLACIÓN	100
6.5.2	IMPACTOS POTENCIALES SOBRE LA POBLACIÓN Y ACTIVIDADES ECONÓMICAS	101
6.5.3	ACEPTACIÓN POR PARTE DEL PRESTADOR DEL SERVICIO	107
6.6	SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL	108
6.6.1	EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	109
6.6.2	BALANCE ENERGÉTICO	111
6.6.3	VALORIZACIÓN DE LODOS	113
6.6.4	REÚSO DEL AGUA	115
7	PRINCIPALES APORTACIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO	117
8	REFERENCIAS	120
ANEXO I: CONOCIMIENTO DE LAS CONDICIONES LOCALES		122
ANEXO II: CONOCIMIENTO DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO		137
ANEXO III: CASO PRÁCTICO		157

CASOS EJEMPLO

BOX 1.	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AJUTERIQUE Y LEJAMANÍ, HONDURAS	8
BOX 2.	EJEMPLO DE SISTEMA MULTIPLICATIVO. EL MARCO DE PRIORIZACIÓN EN EL PNTAR DE ARGENTINA.	31
BOX 3.	EJEMPLO DE ASIGNACIÓN DE PESOS POR DIFERENTES ACTORES	59
BOX 4.	NORMATIVAS DE VERTIDO EN LATINOAMÉRICA	124

FIGURAS

FIGURA 1.	FASES DEL CICLO DE PROYECTO (ADAPTADO DE CE, 2004)	10
FIGURA 2.	PROYECTO COMPLETO DE CREACIÓN DEL SERVICIO DE SANEAMIENTO Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	11
FIGURA 3.	RELACIONES ENTRE EL PROYECTO Y LAS CONDICIONES LOCALES	15
FIGURA 4.	RELACIONES ENTRE DECISIONES Y ESTUDIOS DEL PROYECTO	16
FIGURA 5.	EJEMPLO DE PROCESO DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS MEDIANTE ÁRBOLES DE DECISIÓN (WAGNER, 2010)	18
FIGURA 6.	EJEMPLO DE METODOLOGÍA DE SELECCIÓN JERÁRQUICA DE TECNOLOGÍA (CEPIS, 2003)	21
FIGURA 7.	EJEMPLO DE ESQUEMA DE ANÁLISIS DE CRITERIOS (WAGNER, 2010)	26
FIGURA 8.	EJEMPLOS DE FUNCIONES DE PUNTUACIÓN DE CRITERIO (THOKALA ET AL., 2016)	30
FIGURA 9.	MATRIZ MULTICRITERIO	34
FIGURA 10	METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	47
FIGURA 11	RECONOCIMIENTO DE LOS TERRENOS DISPONIBLES PARA LA IMPLANTACIÓN DE UNA PTAR, SANTO TOMÁS, NICARAGUA	57
FIGURA 12	PTAR DE SAN MARCOS LA LAGUNA, SOLOLÁ, GUATEMALA (FOTOGRAFÍA DE AMSCLAE)	58
FIGURA 13	CLASIFICACIÓN DEL POTENCIAL PARA GENERAR IMPACTOS EN LA POBLACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS (MARM, 2010)	67
FIGURA 14.	MATRIZ DE DECISIÓN	69
FIGURA 15.	CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR UASB DE LA PTAR DE GRANADA, NICARAGUA	87
FIGURA 16.	PTAR DE TOLEDO, ESPAÑA	90
FIGURA 17.	CURVA TEÓRICA DE IMPLANTACIÓN DE LA LÍNEA DE TRATAMIENTO BASADA EN FILTRO PERCOLADOR EN EL SALVADOR (AECID, 2021b)	93
FIGURA 18	COMPARATIVA DE CURVAS DE IMPLANTACIÓN TIPO PARA LÍNEAS DE TRATAMIENTO BASADAS EN LA TECNOLOGÍA DE AIREACIÓN EXTENDIDA (AECID, 2021b)	96
FIGURA 19	TERRENO DE UBICACIÓN DE UNA PTAR PRÓXIMA A ZONAS HABITADAS	102
FIGURA 20	LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS (SANTA CRUZ, BOLIVIA)	104
FIGURA 21	PTAR CON ELEVADO IMPACTO VISUAL	107

TABLAS

TABLA 1.	TAREAS PARA EL ANÁLISIS MULTICRITERIO POR MODELOS BASADOS EN MEDICIÓN DE VALORES	22
TABLA 2.	EJEMPLO DE PROPUESTA DE NIVELES DE PONDERACIÓN	63
TABLA 3.	EJEMPLO DE ESTABLECIMIENTO DE NIVELES DE VALORACIÓN PARA ATRIBUTOS CUANTIFICABLES APLICADO AL CRITERIO DE COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.	66
TABLA 4.	EJEMPLO DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE CRITERIOS	71
TABLA 5.	ANÁLISIS DE SITUACIONES DONDE SE VALORA EL FACTOR DE “CALIDAD REQUERIDA DEL EFLUENTE”	76

TABLA 6 NIVELES DE TRATAMIENTO ALCANZADO SEGÚN LA TECNOLOGÍA IMPLANTADA, TOMADO DE AECID, 2021 Y ADAPTADO POR LOS AUTORES	77
TABLA 7. ANÁLISIS DE LA IMPORTANCIA DEL FACTOR “CONTAMINANTES DEL AGUA RESIDUAL A TRATAR” EN FUNCIÓN DE LAS CIRCUNSTANCIAS LOCALES	79
TABLA 8. VALORES LÍMITE DE SUSTANCIAS INHIBIDORAS PARA PROCESOS BIOLÓGICOS. (EPA-430/9-76-017)	79
TABLA 9. COMPORTAMIENTO DE ALGUNAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE CONCENTRACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES A TRATAR (ADAPTADA DE MMAYA, 2021)	80
TABLA 10. ANÁLISIS DE LA IMPORTANCIA DEL FACTOR “VARIACIONES DE CAUDAL Y CARGA” EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN LOCAL	81
TABLA 11. TOLERANCIA A LAS VARIACIONES DE CAUDAL Y CARGA DE LAS AGUAS A TRATAR DE ALGUNAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO (MMAYA, 2021)	83
TABLA 12. ANÁLISIS DE LA IMPORTANCIA DEL FACTOR “SUPERFICIE DISPONIBLE” EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN LOCAL	85
TABLA 13. ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE NECESARIA (M²/HAB) PARA ALGUNAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO(MMAYA, 2021)	85
TABLA 14. ANÁLISIS DE LA IMPORTANCIA DEL FACTOR “REQUERIMIENTOS DE PERSONAL CUALIFICADO” EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN LOCAL	88
TABLA 15. CLASIFICACIÓN DE DIFERENTES LÍNEAS DE TRATAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA COMPLEJIDAD DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (MMAYA, 2021)	89
TABLA 16. ANÁLISIS DE SITUACIONES DONDE SE VALORA EL FACTOR “DISPONIBILIDAD DE REPUESTOS Y SERVICIO TÉCNICO”	91
TABLA 17. CLASIFICACIÓN DE DIFERENTES LÍNEAS DE TRATAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE REPUESTOS Y SERVICIO TÉCNICO (ELABORACIÓN PROPIA).	91
TABLA 18. ANÁLISIS DE SITUACIONES DONDE SE VALORA EL FACTOR DE “COSTOS DE CONSTRUCCIÓN”	95
TABLA 19. ANÁLISIS DE LA IMPORTANCIA DEL FACTOR DE “COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO”	98
TABLA 20. ESTIMACIÓN DE LA COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (USD/HAB) PARA LAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO CONSIDERADAS (MMAYA, 2021)	99
TABLA 21. ANÁLISIS DE LA IMPORTANCIA DEL FACTOR DE “ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA POBLACIÓN”	101
TABLA 22. ANÁLISIS DE SITUACIONES DONDE SE VALORA EL FACTOR DE “RIESGO DE AFECCIÓN POR OLORES”	102
TABLA 23. RIESGO DE PRODUCCIÓN DE OLORES PARA LAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO CONSIDERADAS (MMAYA, 2021)	103
TABLA 24. ANÁLISIS DE SITUACIONES DONDE SE VALORA EL FACTOR DE “RIESGO DE AFECCIÓN POR RUIDOS”	105
TABLA 25. RIESGO DE EMISIÓN DE RUIDOS PARA LAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO CONSIDERADAS (MMAYA, 2021)	105
TABLA 26. ANÁLISIS DE SITUACIONES DONDE SE VALORA EL FACTOR DE “IMPACTO VISUAL”	106
TABLA 27. GRADO DE INTEGRACIÓN AMBIENTAL DE LAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO CONSIDERADAS (MMAYA, 2021)	106
TABLA 28. ANÁLISIS DE SITUACIONES DONDE SE VALORA EL FACTOR DE “ACEPTACIÓN POR PARTE DEL PRESTADOR”	108
TABLA 29. ANÁLISIS DE SITUACIONES DONDE SE VALORA EL FACTOR DE “EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO”	110

TABLA 30. POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI PARA ALGUNAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO(ELABORACIÓN PROPIA)	110
TABLA 31. ANÁLISIS DE SITUACIONES DONDE SE VALORA EL FACTOR DE “BALANCE ENERGÉTICO”	111
TABLA 32. POTENCIAL DE OBTENER NEUTRALIDAD ENERÉTICA EN ALGUNAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO (ELABORACIÓN PROPIA)	112
TABLA 33. ANÁLISIS DE SITUACIONES DONDE SE VALORA EL FACTOR DE “VALORIZACIÓN DE LODOS”	113
TABLA 34. GENERACIÓN DE LODOS (M³/AÑO) EN LAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO CONSIDERADAS (MMAYA, 2021)	114
TABLA 35. ANÁLISIS DE SITUACIONES DONDE SE VALORA EL FACTOR DE “REÚSO DEL AGUA”	115
TABLA 36. ADECUACIÓN PARA REÚSO EN ALGUNAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO (ELABORACIÓN PROPIA)	116
TABLA III.19. ADECUACIÓN PARA REÚSO EN LAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO CONSIDERADAS (ELABORACIÓN PROPIA)	175

GLOSARIO

AE:	Aireación Extendida
AECID:	Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo
ADMC:	Análisis de Decisión Multicriterio
CBR:	Contactador Biológico Rotativo (biodiscos, biocilindros, etc.)
CEDEX:	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CENTA:	Centro de Nuevas Tecnologías del Agua
CEPIS:	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
CF:	Coliformes fecales
CT:	Coliformes totales
DBO₅:	Demanda biológica de oxígeno en cinco días
DQO:	Demanda química de oxígeno
DSS:	Sistemas de apoyo a la decisión (Decision Support System)
ESP:	Espesador por gravedad
FAFA:	Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente
FCAS:	Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento
FIA:	Filtros intermitentes de arena
FIAr:	Filtros intermitentes de arena con recirculación
FP:	Filtro percolador
GEI:	Gases de efecto invernadero
hab.:	Habitantes
HUM:	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial
HUMh:	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial horizontal
HUMv:	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial vertical
IFAS:	Proceso de lodos activos mixto, en suspensión y en lecho fijo
LAG:	Lagunas de estabilización
LOMB:	Lombrifiltros o vermifiltros
MAVT:	Métodos Multiatributo basados en teoría de valores (Multi-Attribute Value Theory)
MBR:	Reactores Biológicos de Membrana (Membrane Bio-Reactors)
NMP:	Número más probable
NT:	Nitrógeno total
ODS:	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OTE	Eficiencia de transferencia de oxígeno (oxygen transfer efficiency)
O&M:	Operación y mantenimiento
PreT:	Pretratamiento
PT:	Fósforo total
PTAR:	Planta de tratamiento de aguas residuales. Entendidas en este texto como aguas residuales provenientes de poblaciones

RAFA:	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
RALF:	Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado
SBR:	Reactor secuencial de lodos activados (Sequencing Batch Reactor)
SP:	Sedimentador primario
TI:	Tanque Imhoff
Ud:	Unidad
UFC:	Unidades formadoras de colonias
USD:	Dólar estadounidense
VAB:	Valor añadido bruto

I INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Latinoamérica ha experimentado en los últimos años progresos sustanciales en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y, en concreto, en el ODS 6 para garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Sin embargo, la meta 6.3, centrada en la reducción de la contaminación vertida, se reconoce como una de las más difíciles de alcanzar y muchos países están ya asumiendo que no va a ser posible reducir a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar de las poblaciones.

Quizás, una de las principales causas para no haber podido avanzar como se esperaba haya sido que el problema no se ha dimensionado adecuadamente. El tratamiento de las aguas residuales en las poblaciones es una materia incipiente en muchos países y su desarrollo no es solo una cuestión de infraestructuras, sino que se trata de crear un servicio y un sector completo que sea capaz de sostenerlo. Lograr una evolución como la planteada en la meta 6.3 hubiera requerido de una ambiciosa planificación, que actuara sobre todos los aspectos que deben evolucionar en el sector, así como de un marco regulatorio e institucional que facilitara ese progreso.

Por otra parte, si en un país el avance en tratamiento de aguas es todavía limitado, normalmente implica que el número de profesionales adecuadamente capacitados de los que dispone es reducido. En lo que respecta al diseño, construcción y operación de plantas de tratamiento va a ser necesario reclutar a nuevos técnicos y apoyar la capacitación de los que empiezan a trabajar en el sector. Con objeto de contribuir a este apoyo en Latinoamérica, desde la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) se están elaborando una serie de guías y recomendaciones sobre diferentes aspectos que tienen que ver con el desarrollo del tratamiento de las aguas residuales. Todas ellas están basadas en la experiencia y las lecciones aprendidas en proyectos en Latinoamérica y abordan temáticas concretas donde se ha detectado que resulta conveniente reforzar el conocimiento de los técnicos. Una de estas temáticas es la de elaboración de proyectos de saneamiento y tratamiento de aguas residuales, donde se están generando en una serie de guías y herramientas cuyo fin es apoyar en la concepción de unos proyectos más sostenibles. Dentro de esta serie se enmarca la presente publicación, centrada sobre uno de los aspectos fundamentales de los proyectos, el estudio de alternativas de tratamiento.

Cuando se proyecta el saneamiento y tratamiento de las aguas residuales de una población, es necesario adoptar muchas decisiones de carácter técnico; cada una de ellas afectará a las demás y entre todas determinan las soluciones y la estrategia a seguir en ese desarrollo, por lo que deberían estar soportadas por estudios adecuados. De entre todos estos estudios, probablemente el análisis de alternativas de tratamiento sea el más laborioso, debido a la gran cantidad de factores que pueden condicionar la selección y a la gran cantidad de alternativas posibles. Sin embargo, en ocasiones, este estudio se obvia o se realiza de una manera deficiente, con análisis superficiales y poco sistemáticos. Es relativamente habitual encontrar soluciones tecnológicas demasiado sofisticadas en poblaciones que no disponen ni de los recursos humanos ni económicos para operarlas y mantenerlas y que acaban siendo abandonadas.

En este contexto, poder contar con metodologías y herramientas que guíen a los proyectistas en una selección de alternativas adecuada y debidamente justificada resulta de gran utilidad. Con este objetivo el Departamento del Fondo de Cooperación para el Agua Saneamiento (FCAS) de la AECID ha

encargado al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) la elaboración de esta guía.

Esta guía se plantea para apoyar tanto a las administraciones como a los técnicos implicados en la realización de proyectos de agua y saneamiento en Latinoamérica, con objeto de evitar errores típicos de la fase de análisis y selección de alternativas. Adicionalmente se pretende afianzar conceptos sobre la importancia que la fase de estudios previos tiene dentro del ciclo de proyecto para asegurar la sostenibilidad del servicio del tratamiento de aguas residuales.

Contenidos del documento

En estas recomendaciones se expondrán los aspectos técnicos, económicos y ambientales que habitualmente han de ser tomados en consideración en un proceso de selección de alternativas de tratamiento, identificando en su caso si pueden tener un carácter limitante. Se propondrá un método sistemático para análisis y selección de alternativas de tratamiento y se harán recomendaciones sobre la forma de proceder a la hora de ponderar los distintos criterios y de valorar las distintas alternativas en el proceso de selección propuesto.

Existen diferentes procedimientos multicriterio para la selección de alternativas y la idoneidad de utilizar uno u otro va a depender del contexto específico. En esta monografía se recomienda una metodología flexible y eminentemente práctica, basada en el conocimiento de los tratamientos y de las condiciones locales donde, tras la identificación de los factores más adecuados para el contexto concreto y a partir de los mismos, se evalúan las distintas alternativas tecnológicas por medio de matrices de decisión multicriterio. Aunque cualquier método de análisis siempre requiere de cierto grado de subjetividad, el hecho de que queden bien reflejadas las razones y justificación de cada valoración y de la elección final resulta muy conveniente para su aceptación.

Esta monografía, después de los capítulos introductorios, se divide en dos partes fundamentales: La primera aborda las cuestiones de carácter general que es necesario conocer para fundamentar adecuadamente un estudio de alternativas de tratamiento y la segunda se centra en la metodología propuesta, detallando todos los pasos a seguir para lograr una evaluación adecuada y aportando en cada uno de ellos una serie de recomendaciones, ejemplos y lecciones aprendidas que pueden ser de utilidad para el técnico que se enfrenta con esta tarea.

Dentro de los aspectos generales se ahonda en dos cuestiones que generalmente se desatienden o no se conocen adecuadamente: en el capítulo 3 se analiza el contexto en el que se va a abordar el estudio de alternativas de tratamiento, dentro de la fase de preinversión de un proyecto de saneamiento y tratamiento, y en el capítulo 4 se exponen los conceptos básicos de los estudios multicriterio. Muchas veces los técnicos afrontan la realización de los estudios alternativas cargados de sentido común y de buena voluntad, pero sin ningún conocimiento previo sobre lo que las metodologías de análisis multicriterio pueden ofrecer. Los conceptos aportados en este capítulo pueden ser de utilidad para la formación de los técnicos, ayudándoles a desarrollar una metodología más robusta y facilitándoles a la vez el entendimiento del trabajo que realizan.

La segunda parte comienza en el capítulo 5, que sería el más relevante de la guía, pues expone en detalle el desarrollo de la metodología propuesta. Complementariamente a este capítulo se han incluido dos anexos: el anexo I donde se exponen las cuestiones referentes a la obtención de la información sobre el contexto y el anexo II dedicado al conocimiento y estudio de las alternativas de tratamiento. Para poder realizar un correcto análisis es imprescindible conocer adecuadamente los condicionantes locales y las alternativas que se pueden plantear y en cada uno de estos campos va a

ser necesario realizar estudios específicos para obtener la información. Debido a la singularidad y extensión de estos estudios se ha preferido incluirlos como anexos en esta guía. El capítulo 6, que cerraría la descripción metodológica, incluye un detallado análisis de los criterios que más comúnmente se emplean en el estudio de alternativas de tratamiento, aportando sugerencias sobre su consideración y evaluación dentro del proceso de toma de decisiones.

Por último y como cierre del documento, se incluye un capítulo final donde se resumen las principales recomendaciones y un tercer anexo donde se resuelve un caso práctico hipotético, con el objetivo de ilustrar la aplicación práctica de la metodología propuesta.

2 OBJETO Y APLICACIÓN DE ESTA GUÍA

A quién van dirigidas estas recomendaciones

Desde el inicio debe quedar claro que estas recomendaciones para la selección de tecnologías de tratamiento van dirigidas a los técnicos especialistas de la región. No se trata, por tanto, de un documento divulgativo resumido y de fácil lectura para los ajenos a esta materia, sino de un documento técnico especializado que aporta contenidos de utilidad práctica para ayudar a los proyectistas y a los técnicos de las entidades promotoras a encarar y desarrollar más adecuadamente el ejercicio de selección de alternativas.

Será de lectura recomendada también para todos los profesionales implicados en cualquier fase del desarrollo de este tipo instalaciones, desde su concepción más general en un plan sectorial hasta su materialización en cada una de las poblaciones. Las alternativas que se puedan implantar en una población no debería ser solo un dilema del proyecto, sino que ha de tenerse en cuenta también desde que se diseñan las políticas, estrategias y normativa de un país.

Adicionalmente y en lo que respecta a su aplicación en estudios concretos, la información general que se aporta en esta guía sobre métodos de análisis multicriterio y sobre el contexto de la toma de decisiones en un plan director pueden resultar de mucha utilidad, también, para afrontar de una manera más adecuada cualquier decisión que se ha de adoptar en este contexto, especialmente la selección del terreno donde ubicar la planta de tratamiento. Si bien este aspecto concreto, por su trascendencia, será objeto de una guía específica que están preparando el CEDEX y la AECID.

Alcance y limitaciones en la aplicación de esta guía

Esta guía no abarca todas las posibilidades de saneamiento, sino que se centra exclusivamente en la selección de las tecnologías y la línea de tratamiento más adecuada, en caso en el que se haya optado por realizar un saneamiento colectivo de la población con una planta de tratamiento para tratar las aguas residuales. Su objetivo, como se ha dicho, es servir de apoyo a los técnicos, tanto de las empresas consultoras como de las administraciones o entidades supervisoras locales, en el proceso de selección de las tecnologías de tratamiento que mejor se adapten a su contexto. Para ello se proporciona una metodología que se adapta a múltiples escenarios y puede ser seguida con claridad cualquier actor implicado en la decisión.

Los estudios de alternativas se afrontan para decidir qué línea de tratamiento se ha de desarrollar en el proyecto constructivo. En algunos casos, antes de llegar a este punto, en la identificación previa del proyecto, se puede realizar una primera aproximación al análisis, con objeto de tener una idea de las tecnologías que podrán ser consideradas. Si bien, en ese momento, el estudio no puede ser ni exhaustivo ni determinante puesto que no se dispone de toda la información necesaria. Esta guía se ha centrado en el estudio de toma de decisiones que determinará la línea a construir, aunque muchas de las recomendaciones incluidas serán también de utilidad en el caso de realizar una primera aproximación la identificación del proyecto.

El apoyo que proporciona esta guía será probablemente más necesario cuanto más pequeña sea la instalación de tratamiento, dado que en las pequeñas poblaciones confluyen una serie de características que complican singularmente el estudio de alternativas, como son: en la mayor parte de los casos se cuenta con pocos recursos económicos y escasa capacidad técnica, lo que en ocasiones afecta a los proyectos, que son realizados por ingenieros sin la suficiente experiencia y conocimiento; por su reducido tamaño es posible plantear una variedad de tecnologías mucho mayor que en las grandes

poblaciones; las características de las aguas a tratar presentan una variabilidad muy grande de unas poblaciones y otras, presentándose situaciones muy singulares. Todos estos aspectos afectan de manera sustancial a los elementos del análisis de alternativas derivando en que este estudio pueda ser mucho más complicado en las pequeñas poblaciones que en las grandes. Por todo ello y teniendo en cuenta que los grandes proyectos generalmente van a poder contar con recursos y consultoras muy experimentadas, en la redacción de esta guía se ha tomado como rango de población objetivo el que se extendería entre los 1 000 y los 50 000 habitantes, dejando de lado el análisis de posibles tecnologías que serían más propias de grandes y sofisticadas instalaciones.

Asimismo, se debe destacar que con la metodología propuesta no se ha pretendido dar una receta universal y sencilla con el objeto de simplificar un problema que no se puede ni debe banalizar. Por el contrario, esta metodología requiere de un concienzudo análisis del problema para poder determinar en cada caso concreto cuáles van a ser los condicionantes más importantes de la decisión y las alternativas más viables. En el texto se expone, de manera minuciosa, el proceso de creación del modelo de decisión sobre el que sustentar la toma de decisiones e incluye múltiples recomendaciones, tanto para su construcción como para el estudio de criterios y para la valoración de cada una de las alternativas dentro de cada aspecto.

Aunque no se puede pretender que se sigan al pie de letra todas las propuestas que se incluyen en estas recomendaciones, con seguridad, su consideración permitirá al técnico ponerse en situación y entender mejor las dificultades a las que se enfrenta en cada paso de este proceso, ayudándole en la construcción y valoración de su propio modelo de decisión.

Elaboración de la guía y autoría de la metodología propuesta

Los autores de este texto pertenecen al CEDEX y trabajan en el Área de tecnología del Agua del Centro de Estudios Hidrográficos. El CEDEX es un organismo oficial de la administración central española incluido en el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y con dependencia funcional de este ministerio y del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Presta asistencia técnica especializada en el desarrollo de infraestructuras y en materia de medio ambiente, fundamentalmente a la administración española, aunque también a otros países, destacando el apoyo dado en los últimos 10 años al desarrollo de los programas del FCAS. Durante este periodo sus técnicos han dado apoyo en materia de agua, saneamiento y tratamiento en 11 países diferentes de Latinoamérica.

La metodología que se recoge en esta guía es el resultado de muchos años de experiencia adquirida en estudios de soluciones de tratamiento en diferentes países, tanto por los técnicos del CEDEX como de otros organismos con los que esta institución ha colaborado en el desarrollo de sus trabajos. Destacan especialmente las lecciones aprendidas en los proyectos de saneamiento y tratamiento de aguas residuales realizados por la AECID en muchos países de Latinoamérica. Asimismo, ha constituido una valiosa fuente de experiencia la participación de la AECID y el CEDEX en la preparación de diferentes guías técnicas sobre tratamiento de aguas servidas, donde gracias a un proceso participativo en el que se ha contado con los técnicos del sector, ha permitido enriquecer de manera importante el conocimiento básico sobre los problemas existentes.

Destaca muy especialmente la colaboración con la Fundación española Centro de Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA), actualmente integrada en la Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía, con quien el CEDEX ha desarrollado diferentes guías y recomendaciones, donde la metodología para la selección de tecnologías de tratamiento fue madurando a lo largo de los años. Apuntes de esta misma metodología y su evolución se pueden encontrar en guías anteriores como el *Manual para la*

implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones (MARM, 2010), las Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador (MARN, 2016) o la Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales de Bolivia (MMAyA, 2021), así como en todas las ediciones del curso de depuración del CEDEX desde el año 2007.

Por todo ello, aunque en las recomendaciones que aquí se presentan se ha seguido avanzando con respecto a las guías anteriores, profundizando en el análisis de los conceptos y mejorando sustancialmente la estructuración de la metodología, no se debe entender que los redactores de este texto son sus autores exclusivos, puesto que no se habría llegado hasta este punto sin los aportes que en su desarrollo y consolidación han tenido muchos técnicos y técnicas del CEDEX y del CENTA a lo largo de los años, pudiéndose destacar especialmente por su contribución a Enrique Ortega de Miguel, Yasmina Ferrer Medina y Raquel Iglesias Esteban (que contribuyeron a su desarrollo durante su estancia en el CEDEX) y a Juan José Salas Rodríguez, Carlos Aragón Cruz y Álvaro Real Jiménez (por el CENTA).

En lo que respecta a la redacción de esta monografía se debe agradecer la contribución de Ana Tejero Andrés, con los diseños del caso práctico, y la revisión de los textos y aportaciones realizadas por María Leal Meca, ambas técnicas del CEDEX.

Finalmente, se debe señalar que mientras se estaban realizando los trabajos de redacción de estas recomendaciones, que era un proyecto que llevaba varios años pergeñándose, se ha conocido la publicación de un manual del Banco Mundial, *A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options* (Brault et al., 2022), que viene a abordar prácticamente la misma temática, aunque con diferencias y con un enfoque muy similar, lo que puede desmerecer la originalidad de este texto. Sin embargo, no se dudó en continuar con el proyecto porque presenta muchas diferencias con esta guía y se entiende que puede seguir siendo una aportación muy útil para muchos técnicos. En cualquier caso, haber llegado a los mismos planteamientos y con los mismos mensajes por diferentes instituciones que trabajan en la región, contribuye a dar solidez a los argumentos que se proponen.

3 CONTEXTO DEL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

La selección de alternativas de tratamiento no es un proceso autónomo en sí mismo. Por el contrario, cuando un proyecto de tratamiento de aguas residuales llega a materializarse en una población, previamente, ha sido necesario adoptar toda una cadena de decisiones que han condicionado completamente las soluciones que se puedan implantar. La gran mayoría de las decisiones importantes para la definición de los sistemas de saneamiento y su sostenibilidad se adoptan en los estudios previos de la redacción del proyecto, pero muchas veces no reciben la atención adecuada, primando llegar cuanto antes a la finalización de los trabajos. Además, las medidas que se puedan adoptar durante los estudios previos del proyecto estarán a su vez condicionadas por otras soluciones adoptadas en planos superiores de decisión.

En este capítulo se pretende poner en contexto el estudio de alternativas de tratamiento, dentro del proceso completo de toma de decisiones que define el camino a seguir hasta llegar al desarrollo del servicio de saneamiento y tratamiento en una población.

3.1 PLANES DE DESARROLLO SECTORIAL

Cuando en un país su nivel de desarrollo en saneamiento y, sobre todo, en tratamiento de aguas residuales es todavía muy incipiente, se debería acometer una planificación que contemplara el desarrollo adecuado de todos los aspectos importantes para estos servicios y para el sector que los ha de sustentar. En la elaboración de esta planificación sectorial se adoptarán ya muchas decisiones que van a condicionar completamente la construcción de los servicios que finalmente se lleve a cabo en cada una de las poblaciones.

Los planes de desarrollo determinarán los objetivos a alcanzar por los servicios que, idealmente, estarán basados en los ODS y en logro del derecho humano al agua y saneamiento, pero complementados por las necesidades y los intereses propios del país. Asimismo, se establecerán los modelos estratégicos de desarrollo, como puede ser la integración con los servicios de abastecimiento, los planteamientos a seguir frente múltiples problemáticas como pueden ser: las evoluciones futuras de la población, la integración y control de las soluciones individuales, el reúso de las aguas residuales o la disposición de lodos. Además, definirán las preferencias frente a los modelos de regulación y prestación de los servicios y sus condicionantes principales (gestión supramunicipal, tarifas, subvenciones, personal capacitado, etc.). Igualmente se podrán establecer los modelos de participación y concientización de la población en el desarrollo. Y sobre todo ello se podrán plantear nuevos marcos de financiación de las infraestructuras y de regulación normativa e institucional que podrán condicionar todos los aspectos anteriores. Cada una de las acciones identificadas en todos estos ejes de desarrollo, incluida la construcción de infraestructuras, se ordenará en un marco de priorización y se establecerán los sistemas para financiarlas.

Resulta evidente que todos y cada uno de los aspectos mencionados van a condicionar el modelo de servicio de saneamiento y tratamiento que se llegue a materializar en una población concreta. Por esta misma razón, a la hora de plantear el desarrollo del servicio a nivel nacional o de revisar las normativas que lo regulen, los técnicos responsables deberían ser conscientes de la complejidad y costo de las instalaciones de tratamiento y de los riesgos existentes para lograr su sostenibilidad. En definitiva, las alternativas de tratamiento que es posible afrontar en cada escenario deberían formar parte de los factores que se toman en cuenta a la hora de diseñar las políticas y estrategias de desarrollo en el país.

3.2 PLANES O ESTRATEGIAS DE CARÁCTER REGIONAL

En muchas ocasiones, entre una planificación a nivel nacional y el proyecto concreto de una población es necesario abordar una planificación intermedia de carácter regional que permita optimizar los servicios de saneamiento y tratamiento de las aguas residuales. Esta planificación puede estar orientada tanto a las soluciones de ingeniería a adoptar, como a los prestadores de los servicios, pudiéndose destacar los siguientes tipos:

- **Planes de cuenca.** La planificación a nivel de cuenca resulta muy conveniente para identificar los impactos generados por los vertidos de las poblaciones en el marco de todas las presiones a las que se ven sometidas las aguas. De esta forma se podrán identificar los objetivos a imponer sobre el saneamiento y tratamiento de las aguas de cada población en relación con la protección del medio ambiente y la afección a los usos del agua.
- **Instalaciones compartidas.** En muchas ocasiones, cuando las circunstancias locales lo permiten (por la cercanía de las poblaciones y/o por una orografía favorable) resulta muy conveniente tratar de optimizar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales, dando servicio en una sola instalación a varios núcleos de población. Las instalaciones de tratamiento son costosas en construcción y en operación por lo que, si se pueden tratar los efluentes de varias poblaciones en una sola instalación se mejorará significativamente la economía de escala, reduciéndose los costos per cápita.

Este tipo de planificación sería muy común en las grandes áreas metropolitanas, donde la escasez de terrenos hábiles y la continuidad física de las sucesivas poblaciones obligan a realizar el saneamiento y tratamiento conjunto, pero también en zonas rurales pueden ser muy apropiadas. Con frecuencia el abastecimiento de agua potable en las zonas rurales se lleva a cabo de forma descentralizada, a través de captaciones de agua subterránea que dan servicio a una vivienda a un grupo reducido de viviendas. Sin embargo, cuando hay que acometer el servicio de saneamiento y tratamiento de aguas residuales, si hay suficiente población concentrada en zonas o localidades muy próximas, puede resultar más conveniente acometer el servicio de forma centralizada y agrupar varios núcleos que hasta ese momento gestionaban su servicio de agua de manera independiente.

La centralización de estos servicios requiere que alguien impulse la iniciativa y adoptar acuerdos entre las partes sobre su gestión, lo que no siempre resulta sencillo. Por ello es recomendable que sea la planificación regional donde se planteen las estrategias, se identifiquen este tipo de situaciones y se articulen los mecanismos para facilitar su implantación, de modo que permitan encarar el desarrollo de la manera más sostenible posible.

Box I. Planta de tratamiento de Ajuterique y Lejamaní, Honduras

Ajuterique y Lejamaní son dos municipios ubicados en el Valle de Comayagua, en Honduras, para los que se había previsto la construcción de una planta de tratamiento en cada uno de ellos, siendo además igual la línea de tratamiento seleccionada (pretratamiento, RAFA, filtro percolador, lagunaje/cloración, eras de secado). Sin embargo, se da la circunstancia de que la distancia entre las dos poblaciones es tan solo de 2 km. Dada la proximidad entre los dos municipios, se revisaron los proyectos, se debatió con ambas municipalidades y finalmente se

reconsideró la solución, tratando las aguas residuales de ambos municipios conjuntamente en una sola planta.

El ayuntamiento de Lejamaní ya había comprado los terrenos necesarios para la construcción de la PTAR y desde Ajuterique el agua residual podía llegar por gravedad, por lo que se acordó construir la planta en dicho predio. Sin embargo, no fue posible ampliar el terreno por lo que fue necesario modificar la línea de tratamiento para adecuarla a la superficie disponible, con las siguientes consideraciones: el pretratamiento se realiza en cada municipio por separado, antes del envío del agua a la PTAR y posteriormente al RAFA se añadió un FAFA, con objeto de poder reducir la laguna final, que queda de pulimento. Esta unificación ha permitido contar con un único servicio de tratamiento para las dos poblaciones, optimizando los recursos.



PTAR de Ajuterique y Lejamaní (Fotografía de Óscar García Toro)

- **Sistemas supramunicipales de prestación de servicios.** El tratamiento de las aguas residuales puede ser un servicio muy caro de sostener y sus costos están muy condicionados por la economía de escala. Es evidente que, en el caso anterior, cuando existen soluciones compartidas entre diferentes poblaciones, la unificación del prestador del servicio es necesaria, pero también en otros casos, aunque se cuente con instalaciones independientes, será muy conveniente contar con entidades supramunicipales que atiendan todas las instalaciones, de esta forma se podrán optimizar los recursos y se dispondrá de personal más capacitado que permitirá asegurar la sostenibilidad de las instalaciones.
- **Gestión centralizada de lodos.** Gestión Con el mismo objetivo de mejorar la economía de escala, en algunos casos se establece también una gestión compartida de los lodos generados en la PTAR. En los países donde el tratamiento de aguas se encuentra muy desarrollado y consecuentemente se generan grandes cantidades de lodos, es muy común que se implanten centros de recogida y tratamiento de los lodos generados en las plantas pequeñas. Estos centros serían instalaciones independientes o se ubicarían en una PTAR de mayor tamaño. De esta forma se libera a las pequeñas instalaciones de asumir esta tarea y se gestiona de manera más ordenada todo el lodo generado en una comarca, asegurando en la medida de lo posible su valorización por aplicación agrícola.

Evidentemente, si la población donde se va a desarrollar el proyecto se encuentra condicionada por alguno de estos planes o estrategias de carácter regional, las soluciones que se puedan o deban adoptar en el tratamiento quedarán condicionadas también por ello. De hecho, es precisamente el logro de la sostenibilidad de las instalaciones tratamiento que se puedan implantar en una zona lo que lleva a acometer estas estrategias de carácter regional.

3.3 PROYECTOS DE SANEAMIENTO Y TRATAMIENTO

El contexto del estudio de alternativas puede ser muy distinto dependiendo del tipo de proyecto que se esté realizando. Puede haber casos en los que solo sea necesario remodelar o ampliar la planta de tratamiento existente, en otros ya existirá la red de saneamiento y el proyecto se limitará a la construcción de la PTAR y en otros, los más complejos, será necesario construir tanto la red como la planta. En todos ellos sería necesario realizar un estudio para determinar la mejor alternativa a implantar, pero habrá diferencias importantes: en el primer caso se podrán conocer con precisión la gran mayoría de factores que condicionan la decisión y las alternativas posibles se verán muy limitadas si se quieren aprovechar las instalaciones existentes; en el segundo se podrá disponer de una información completa y precisa sobre muchos de los factores fundamentales; en el tercero, por el contrario, habrá muy poca información disponible antes de comenzar los estudios y muchos de los factores fundamentales solo se podrán estimar.

El ciclo de proyecto

Independientemente de cómo se articule el desarrollo de las infraestructuras de saneamiento y tratamiento de aguas residuales a nivel local en cada país, por lo general las soluciones a las infraestructuras se materializan a través de proyectos. En la figura 1 se esquematizan las sucesivas fases del ciclo de proyecto.



Figura 1. Fases del ciclo de proyecto (Adaptado de CE, 2004)

Durante las fases de preinversión, de la 2 a la 4 en la figura anterior, es donde tienen lugar la mayor parte de las decisiones importantes que condicionan las soluciones de tratamiento, siendo habitual que el análisis de alternativas se aborde en dos momentos distintos:

- La primera tiene lugar en la fase de identificación de proyecto, aunque esto no se realiza siempre. En ese momento los objetivos del proyecto todavía pueden variar y no es posible profundizar en el estudio, dado que no se dispone de la información necesaria, pero tampoco es este el objetivo. Generalmente este análisis preliminar se limita a trabajar con grupos de

alternativas (extensivas e intensivas) y con curvas de costos y superficies tipo, solo tienen el objetivo de prever el tipo de tecnologías que se podrán implantar, en la medida que las mismas van a condicionar aspectos básicos del proyecto. Por ejemplo, si se trata de una pequeña población y se quiere contar con tecnologías de bajo costo y complejidad, debería procurarse que la disponibilidad de terreno no fuera un limitante.

- El análisis que se realiza en todos los casos tiene lugar en la fase de formulación, tras haber realizado los estudios previos requeridos en la fase de preparación, y en ella será necesaria la justificación detallada de la alternativa seleccionada, ya que será entonces cuando se disponga de la información suficiente para poder hacer una estimación presupuestaria precisa, más acorde a las necesidades de esa fase.

En las fases de preparación y formulación, sobre todo cuando se va a construir toda la red de saneamiento junto con la planta, es necesario realizar muchos estudios y adoptar múltiples decisiones. En este contexto surge la figura del plan director como el instrumento ideal para poder identificar todas las acciones necesarias, dimensionarlas en todos sus detalles y establecer una programación, analizando todos los problemas y tomando las decisiones necesarias en este proceso.

3.4 EL PLAN DIRECTOR DE SANEAMIENTO Y TRATAMIENTO

En muchas poblaciones la intervención necesaria en saneamiento y tratamiento va a ser de tal magnitud que, para poder definir todos los detalles de las actuaciones, requerirá de estudios complejos, donde intervienen muchos factores. En este caso no se tratará solo de una cuestión de infraestructuras, sino que se ha de crear todo un servicio y lograr que sea sostenible. En consecuencia, además de las infraestructuras, los proyectos deberían contemplar el desarrollo de las capacidades del prestador, así como el trabajo con la población para asegurar una utilización correcta de las instalaciones y la demanda del servicio. En la figura 2 se esquematiza la conceptualización de los proyectos de creación de servicio.

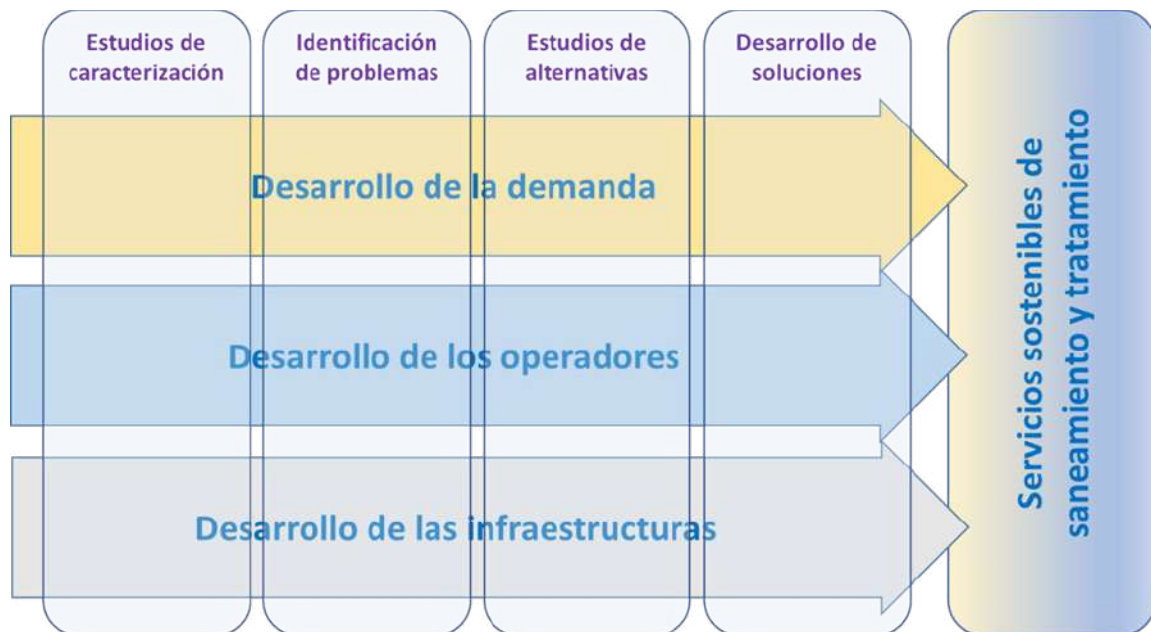


Figura 2. Proyecto completo de creación del servicio de saneamiento y tratamiento de aguas residuales

En este esquema se pretende representar la necesidad del desarrollo acompasado del servicio en sus tres dimensiones, la transversalidad de los estudios a desarrollar y las múltiples interrelaciones entre ellas. La situación en que se encuentra cada uno de estos elementos, los problemas que sufre y las posibles soluciones van a estar fuertemente condicionados por los otros. En concreto, las soluciones técnicas que se puedan implementar en las infraestructuras de saneamiento y tratamiento dependerán de las capacidades del prestador y del compromiso y posicionamiento de la población, como se mostrará más adelante.

El plan director agrupa los estudios necesarios para la definición de estos servicios y determinará su modelo de implantación y su desarrollo futuro, así como todos los aspectos técnicos en relación con sus infraestructuras. Su alcance y complejidad dependerá de los servicios contemplados en cada caso, de la situación de partida en que se encuentren y del tamaño y estructura de la población.

La implicación de los diferentes actores y de la población beneficiaria en la toma de decisiones varía también, en general, con las dimensiones de la población y con la complejidad de los sistemas necesarios. La toma de decisiones no se puede plantear de la misma manera en las grandes áreas metropolitanas, con millones de habitantes y múltiples núcleos de población que en las pequeñas poblaciones rurales dispersas.

Un plan director debe adoptar múltiples decisiones técnicas que requerirían de un estudio de alternativas específico. Por ejemplo, considerando exclusivamente el eje de desarrollo de las infraestructuras, será necesario determinar el tipo y configuración de la red de saneamiento, escoger el terreno para ubicar la planta de tratamiento, determinar el destino de los lodos de tratamiento, definir la gestión de los sistemas individuales o concretar el alcance de la remodelación de las instalaciones existentes. El estudio de alternativas de tratamiento se encuentra ubicada en esta malla de decisiones con las que estará estrechamente relacionada.

Para analizar de manera adecuada toda la cadena de decisiones del plan director, será de ayuda estructurar el estudio por planos o niveles, yendo de lo más general a lo más particular. Sin embargo, no es un proceso que se pueda ordenar de una manera sencilla, puesto que muchas de las decisiones, como ya se ha mencionado, van a estar condicionadas en mayor o menor grado por las otras; incluso los problemas particulares en una zona concreta pueden afectar a los planteamientos más generales. Por ello, el estudio debe contar también con una visión en sentido contrario, de lo particular a lo general. De no preverse esta doble perspectiva, se podrían estar adoptando soluciones aparentemente lógicas, pero, al final del proceso, las soluciones de detalle resultantes no suponen en su conjunto ni la solución más adecuada ni la más sostenible.

El tratamiento de las aguas residuales se encuentra al final del ciclo urbano del agua y, por tanto, la selección de alternativas se verá condicionada de manera directa o indirecta por la mayoría de las decisiones de nivel estratégico superior. Para poder llegar a este punto con opciones de plantear soluciones sostenibles, los condicionantes principales de las alternativas de tratamiento deberían tomarse en cuenta como un factor también en estas decisiones de rango superior o más general.

A continuación se sintetizan las cuestiones técnicas más importantes a decidir en un plan director y su influencia el estudio de alternativas de tratamiento. Aunque no sea posible definir una linealidad muy clara en el proceso de toma de decisiones, sí pueden presentarse de una forma jerárquica, que es la que se sigue en este apartado.

Configuración general del sistema

Primeramente, en el plano más alto, se determinaría la configuración general del sistema de saneamiento. Para ello se analizaría la globalidad del área metropolitana (la actual y la que previsiblemente quede integrada en el futuro), la delimitación de sus vertientes, el estado actual de las infraestructuras de saneamiento, los objetivos específicos de desarrollo y las circunstancias externas que más pueden condicionar al servicio del saneamiento, en especial los servicios de drenaje urbano y abastecimiento.

En caso necesario, para simplificar el estudio, a partir de un primer análisis general, el ámbito de estudio se disgregará en una serie de áreas que pueden ser objeto de un estudio homogéneo. Posteriormente se realizarían análisis de detalle en cada una de las zonas diferenciadas, con objeto de adaptarse mejor a las circunstancias locales y a las necesidades de los usuarios.

La determinación del número de plantas de tratamiento necesarias y la identificación de sus ubicaciones suele ser uno de los elementos que más condiciona la estructura general del saneamiento. La identificación de los terrenos más adecuados requeriría en sí mismo de un análisis de alternativas específico, ponderando numerosos criterios.

La existencia de posibles zonas diferenciadas por alguna característica dentro del ámbito del plan director puede ser también determinante en la concepción global del sistema. Por ejemplo, zonas acotadas por condiciones geográficas (delimitaciones de cuencas o carreteras principales) o zonas con actividades singulares (polígonos industriales o zonas turísticas). En relación con la presencia de zonas industriales es importante destacar que las decisiones adoptadas respecto a su integración o no en la red de saneamiento repercutirán significativamente sobre las alternativas de tratamiento.

Otro factor que puede llegar a condicionar de manera importante el tipo de desarrollo sería la capacidad real de la población de asumir nuevas inversiones. De nada le sirve a una ciudad prever la centralización de todo el saneamiento en una gran planta de tratamiento porque teóricamente se optimiza la operación y mantenimiento, si luego no va a ser capaz de conseguir la financiación suficiente para construirla. En estos casos sería más realista concebir un saneamiento más descentralizado, con más plantas de tratamiento y de menor tamaño, que puedan ser construidas por etapas, con sus propios recursos.

En este análisis general se establecería también qué zonas continúan con sistemas individuales de saneamiento y en qué circunstancias se irán integrando al sistema colectivo.

La necesidad de introducir este primer plano de decisión y su distancia con respecto a las soluciones de detalle será más importante cuanto mayores sean las dimensiones y la complejidad del área urbana incluida en el proyecto. En pequeñas poblaciones, frecuentemente, las principales decisiones (configuración de la red de alcantarillado, ubicación de la PTAR y tecnología de tratamiento) forman parte prácticamente del mismo estudio de soluciones.

Otras decisiones de carácter general

Otras decisiones de carácter general que determinarán los objetivos del proyecto de saneamiento y tratamiento de las aguas serían las que hacen referencia a la integración de otros servicios y a las salidas del sistema, pudiéndose destacar las siguientes:

- **Gestión de drenajes pluviales.** En ocasiones se opta por realizar un saneamiento combinado o semicombinado de las aguas pluviales junto con las residuales. Las decisiones

adoptadas sobre la posible unificación de servicios repercutirán significativamente sobre las plantas de tratamiento.

En el caso de redes antiguas, donde por conexiones erradas o por su mal estado se produzca una entrada importante de aguas de escorrentía, la decisión que debe tomarse será si se rehabilitan o no estas partes de la red.

- **Soluciones para la gestión de los sistemas individuales.** El plan director de saneamiento debería contemplar no solo la parte de la población que es posible conectar por sistemas colectivos sino también aquella que debe mantenerse con sistemas individuales. Para estas soluciones debe prever también una gestión adecuada del servicio y regular el destino de los vaciados, derivándolos hacia las plantas de tratamiento más cercanas. La carga contaminante que llega a la planta por este aporte de los camiones atmosféricos o de gestión de excretas, podría condicionar la línea de tratamiento.
- **Posibles destinos del agua tratada.** En ocasiones dentro de un plan director se pueden barajar diferentes opciones respecto al punto de vuelco del efluente. Los medios receptores podrán presentar sensibilidades diferentes a las descargas y, por tanto, condicionarán en mayor o menor grado las características del agua tratada. Quizás la diferenciación más clara puede encontrarse cuando se puede optar por llevar la descarga a la parte baja de un río o a un estuario o a mar abierto.

Por otra parte, la escasez de recursos en la zona puede determinar que el efluente de la planta sea demandado para su reutilización en diferentes usos. Si se requiere el reúso de las aguas, las alternativas de tratamiento posibles quedarán completamente condicionadas.

- **Posibles soluciones a la disposición de los lodos generados en las PTAR.** El plan director debería abordar también el análisis de las alternativas para la disposición de los residuos que se generan y, en especial, de los lodos procedentes del tratamiento de las aguas residuales por ser los más complicados en su gestión y los que se producen en mayor volumen. Con frecuencia este aspecto no recibe la atención necesaria y puede llegar a ser uno de los principales condicionantes del tratamiento de las aguas residuales.

Soluciones de detalle

Además de la estructura general del sistema, las decisiones que se puedan adoptar en las zonas concretas también pueden afectar a la selección de la tecnología más adecuada. Un ejemplo muy claro sería el de las zonas con predominancia de instalaciones industriales. En este caso, resulta especialmente conveniente contemplar el problema desde abajo, ya que si se tienen en cuenta las repercusiones que pudiera tener la llegada de sus descargas a la planta de tratamiento, probablemente la mejor solución sea tratar de forma separada las aguas industriales. De esta forma pueden recibir un tratamiento más sofisticado, sin incrementar los costos a toda la población, y se evita que los procesos biológicos de la PTAR se vean afectados por la posible entrada de tóxicos y que los lodos queden inutilizados para su utilización en agricultura.

Dentro de las decisiones sobre cuestiones particulares se encontrará también la selección de materiales y tipologías constructivas de los sistemas de saneamiento individual y de las redes de saneamiento, así como la selección de tecnologías de tratamiento de la PTAR.

3.5 RELACIÓN DEL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO CON OTROS ESTUDIOS

Las dependencias recíprocas entre las diferentes decisiones a adoptar es lo que determina que sea fundamental poner en contexto el análisis de alternativas de tratamiento. En este apartado se incluyen

unas breves reflexiones sobre aquellos estudios que más lo condicionan y a los, a su vez, debería verse condicionar en mayor medida.

De manera sintética se puede decir que el análisis de alternativas de tratamiento consiste en identificar la línea de tratamiento que consiga cumplir con los objetivos del proyecto y se adapte mejor a las condiciones locales. Las condiciones locales que influyen en la decisión serían todas aquellas que pueden tener un efecto sobre los rendimientos de tratamiento, la ejecución de las instalaciones o la sostenibilidad de los sistemas. Algunas de esas condiciones serán ajenas a la influencia del proyecto, como las variables ambientales o el costo de materiales y equipos, pero otras se verán modificadas por el propio proyecto que se pone en marcha. En la figura 3 se ha tratado de representar las afecciones más importantes del propio proyecto sobre las condiciones locales y cómo las mismas repercutirían, a su vez, en las metas del proyecto.

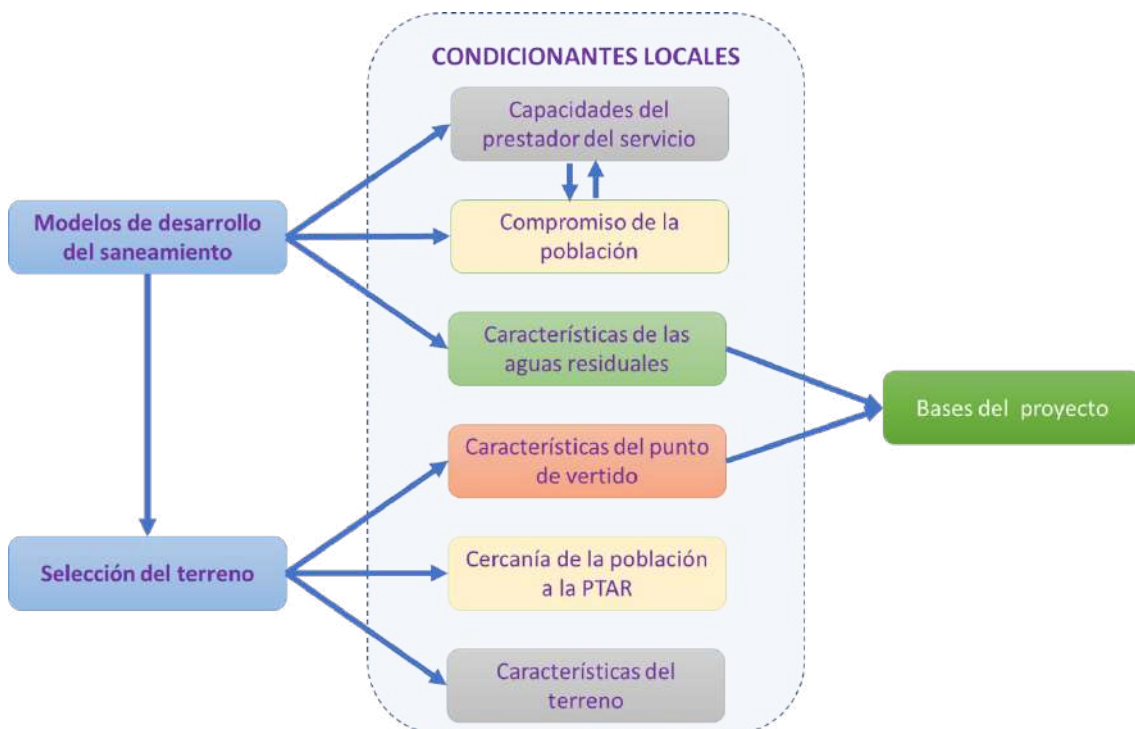


Figura 3. Relaciones entre el proyecto y las condiciones locales

Idealmente, como se ha dicho, dentro del plan director se debería procurar lograr el compromiso de la población con el proyecto. La población debe entender la necesidad de tratar las aguas residuales y exigir que se preste este servicio. Además, se deberían analizar las carencias del futuro prestador y desarrollar las medidas que le permitan alcanzar las capacidades necesarias para prestar adecuadamente el nuevo servicio.

Las decisiones que se adopten sobre la red de saneamiento y su evolución futura, así como sobre las fases de construcción de la PTAR condicionarán por completo las características de las aguas a tratar (caudales y cargas). Asimismo, este planteamiento de desarrollo será un factor determinante en la selección del terreno y, con ello, en múltiples aspectos que pueden condicionar posteriormente la selección de las alternativas de tratamiento.

Las bases del proyecto agrupan las variables que determinan el nivel de tratamiento que se debe alcanzar en un caso concreto. Básicamente estarían integradas por las características de las aguas a tratar y los requisitos a lograr con el tratamiento, en el agua residual y en los lodos producidos. En

esencia, serían las características de las entradas y salidas de la planta y determinarían la configuración de las líneas de tratamiento y el dimensionamiento de los procesos unitarios.

En la figura 4 se muestran, desde un plano más general, las principales relaciones del análisis de alternativas. En la figura, dentro de los modelos de desarrollo estarían incluidas toda la cadena de decisiones que se ha expuesto en los apartados anteriores. Las condiciones locales (que incluyen todos los aspectos señalados en la figura 3) afectarían a todos los elementos y se verían condicionados por el desarrollo del saneamiento y la selección del terreno.

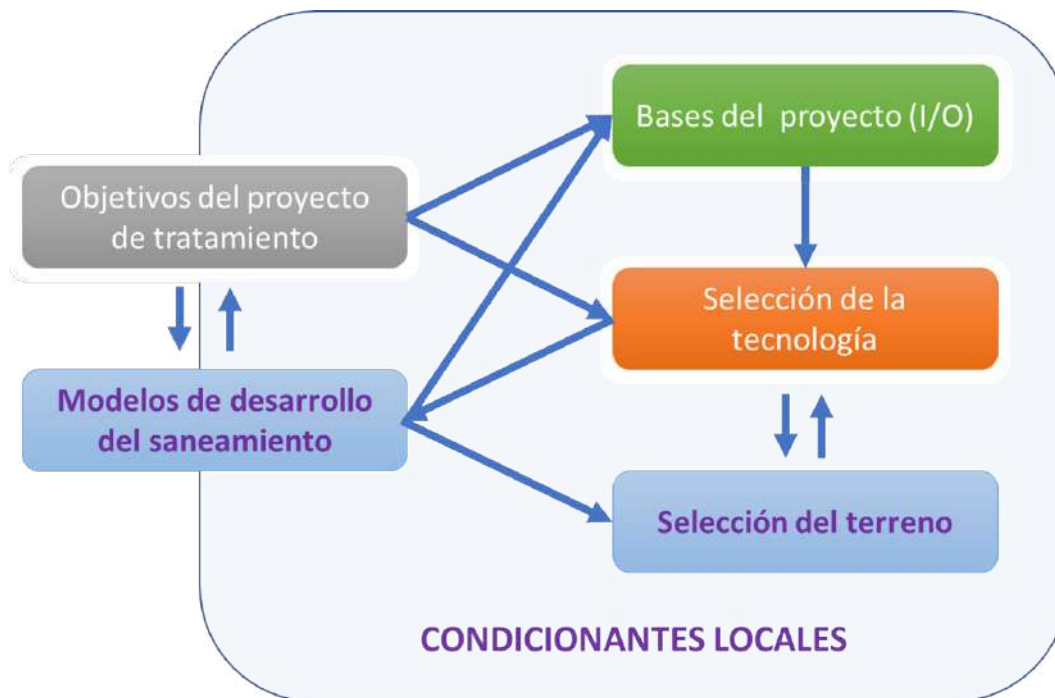


Figura 4. Relaciones entre decisiones y estudios del proyecto

Los objetivos del proyecto y los modelos de desarrollo elegidos condicionarán la selección de alternativas a través de su efecto sobre las bases de partida y los terrenos. Por tanto, las alternativas de tratamiento que se pueden plantear debería ser un factor clave en la toma de decisiones de rango superior. Los ejemplos más claros ya se han destacado: prever un terreno lo suficientemente grande para no limitar la implantación de las tecnologías de tratamiento extensivas que requieren mucha superficie; tratar por separado las aguas de las zonas industriales, para evitar condicionar los procesos de tratamiento en la PTAR y la disposición de lodos; rehabilitar las redes de saneamiento antiguas para evitar la entrada de agua de pluviales o freático; evitar llevar el vuelco de las aguas a medios receptores especialmente sensibles, para no tener que hacer un tratamiento tan riguroso; etc.

4 ASPECTOS BÁSICOS DEL ANÁLISIS DE DECISIÓN MULTICRITERIO

Con frecuencia los técnicos que elaboran los proyectos de tratamiento de aguas residuales son expertos en estos procesos de tratamiento, pero no han tenido una formación específica sobre sistemas de apoyo a la decisión y la única experiencia con la que cuentan es la de los estudios de este tipo que hayan tenido que asumir en sus proyectos. El fin de este capítulo es introducir los sistemas de ayuda a la decisión, con objeto de que el lector sea consciente del campo de conocimiento que hay detrás de estos procedimientos, de la diversidad de metodologías que han sido propuestas, de sus posibles aplicaciones y de la necesidad de conocer las virtudes y limitaciones de cada metodología.

Los contenidos de este capítulo se han basado en gran parte en dos excelentes publicaciones recopilatorias de las técnicas de análisis de decisión multicriterio, la *Guía para la elaboración de recomendaciones basadas en Análisis de decisión multicriterio (MCDA)*, publicada por el Servicio de Evaluación de Tecnologías Sanitarias de Andalucía (AETSA) en 2020 (Márquez-Peláez et al., 2020) y *El Análisis de Decisión Multi-Criterio en el ámbito sanitario Utilidad y limitaciones para la toma de decisiones*, de la fundación Weber (Zozaya González et al., 2018), que, aunque dirigidos a su aplicación en el sector de la salud, sus fundamentos son de completa aplicación también en este sector tecnológico. Si bien, en este capítulo los textos se han organizado de la manera que pudieran resultar más útiles para guiar en el estudio de las alternativas de tratamiento.

Después de esta introducción sobre las nociones básicas de los sistemas de decisión multicriterio, en el siguiente capítulo se realizará la aplicación a la selección de tecnologías de tratamiento.

4.1 GENERALIDADES

Cuando se aborda un proceso de selección de alternativas, comúnmente se van a presentar múltiples objetivos y factores que se contraponen entre ellos. En raras ocasiones se va a contar con una alternativa que sea superior a las demás en relación con todos los condicionantes. Por el contrario, la situación más habitual es que cada alternativa satisfaga los objetivos y factores en un grado diferente y la adopción de la decisión final conlleva asumir un conflicto entre el nivel de cumplimiento de los diferentes objetivos. En un caso así, la situación resulta demasiado compleja para poder llegar a identificar la solución óptima solo con el juicio intuitivo y se requiere de una herramienta o método que permita, a partir de la información disponible, comparar las alternativas posibles en relación con las condiciones locales y los objetivos del proyecto. Estos modelos permiten abordar el problema de decisión multicriterio de una forma sistemática, facilitando el proceso de valoración y mostrando las diferencias entre las alternativas, siendo de gran ayuda para el responsable de tomar la decisión.

Las virtudes de realizar un proceso de selección sistematizado serían:

- **Integración de información compleja:** Permiten obtener una valoración a partir de información compleja de muy diferente tipo, en las que intervienen criterios múltiples y que incluso pueden estar en conflicto.
- **Seguridad en el procedimiento:** Aportan solidez a la toma de decisiones al tratarse de procedimientos mucho más seguros y robustos que el uso del juicio intuitivo. Reduce la posibilidad de cometer errores al seguir un procedimiento ordenado y sistemático y, además, minimiza la posibilidad de pasar por alto alguna circunstancia importante. Al acotar y analizar por separado cada factor determinante, se favorece la objetividad y se limita el posible sesgo subjetivo y, en caso de producirse, se pondría en evidencia.

- **Transparencia:** Reflejan de forma clara en qué medida una alternativa puede ser más ventajosa que otras y las circunstancias fundamentales que decantan la elección. Con todo ello se refuerza su comunicación.
- **Entendimiento del proceso de decisión:** Muestra de manera ordenada el razonamiento seguido para llegar a identificar la opción más adecuada. Resume la información relevante y estructura los procesos de decisión y deliberación.
- **Replicabilidad o trazabilidad:** Relacionado con el aspecto anterior, el proceso se puede seguir y revisar en todos sus desarrollos, así como replicarlo o identificar las cuestiones con las que se puede discrepar y centrar los debates en este sentido.

Todas estas ventajas resultan especialmente necesarias cuando intervienen diferentes actores en la decisión (financiación, construcción y operación de las instalaciones, por ejemplo), puesto que permite a todos ellos comprender las razones y el procedimiento seguido para llegar a la solución elegida y, en su caso, poder manifestar sus dudas y recabar explicaciones sobre los diferentes aspectos tomados en consideración y sobre las metodologías seguidas.

En el campo del tratamiento de las aguas residuales se han aplicado diversas metodologías, más o menos complejas, que permiten apoyar el estudio de alternativas, partiendo todas ellas de la identificación de los criterios que se consideran importantes para la decisión en función de las condiciones locales. Se han desarrollado desde procesos jerárquicos simples, que se sintetizan en árboles de toma de decisión como el que se muestra de ejemplo en la figura 5, hasta complejos software de ayuda a la toma de decisión (DSS-Decision Support System), pasando por las matrices de valoración, semejantes a las habitualmente empleadas en los estudios de impacto ambiental.



Figura 5. Ejemplo de proceso de selección de alternativas mediante árboles de decisión (Wagner, 2010)

El conjunto de métodos que, de manera explícita y sistemática, permite tener en cuenta los diferentes aspectos que condicionan una decisión se conocen internacionalmente como Análisis de Decisión Multicriterio (ADMC o MCDA, del inglés: MultiCriteria Decision Analysis). En un uso correcto del castellano, el término “criterio” de valoración estaría más asociado a una norma ya establecida que permite valorar un aspecto y no al aspecto en sí. Un término más correcto para referirse a estos elementos que condicionan la decisión sería “factor”. Sin embargo, en la literatura especializada, probablemente derivado de una traslación directa del término inglés, se emplea el término “criterio” de forma equivalente al de factor en castellano, por lo que en este texto se hablará indistintamente de criterios y de factores para referirse a los aspectos que deben tenerse en cuenta en la decisión.

Estos sistemas ADCMC permiten desarrollar un proceso de toma de decisiones con una perspectiva holística, haciendo explícitos los valores o dimensiones y su importancia relativa en este proceso y se han aplicado en prácticamente todas las áreas de la ciencia y la tecnología, tanto en el sector público como en el privado.

El ADCMC no sustituye al proceso de toma de decisiones, sino que solo debería entenderse como una ayuda para el mismo, puesto que no se trata de una herramienta de prescripción, como algunas veces

se presenta erróneamente. Estos sistemas siempre estarán sujetos a un grado de subjetividad introducida por quienes lo realizan (juicio u opinión de los autores) y, además, al tratar de simplificar las situaciones complejas para ayudar a la toma de decisiones, se corre el riesgo de la omisión no intencionada de parte de la información que hubiera podido ser relevante para la decisión.

4.2 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS MULTICRITERIO

Existen múltiples métodos de ADMC disponibles que difieren en los objetivos que buscan y en los fundamentos que las sostienen. Los distintos métodos proponen diferentes metodologías de aplicación que condicionan la forma en la que se construyen los modelos de decisión. En algunos casos los modelos desarrollan sofisticados algoritmos para identificar las decisiones óptimas mientras que otros solo tienen como objeto estructurar el proceso de deliberación. En general, todas estas metodologías tienen en común que las valoraciones se expresan para cada criterio de cada alternativa y hay un sistema de agregación que permite comparar los criterios entre sí y combinar las valoraciones.

Los modelos multicriterio que se basan en desarrollos más formales se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- **Modelos basados en medición de valores** (value measurement models). En estos modelos se asignan valores a los factores, se calculan y comparan puntuaciones numéricas que sintetizan el valor global de cada alternativa, reflejando el grado en el que una de ellas es preferida a otra. Las puntuaciones de cada uno de los criterios individuales se agregan en una cifra que representa el valor global de la alternativa. Serían los más usados en el ámbito de la selección de alternativas de tratamiento.
- **Métodos de clasificación o superación** (outranking methods) que se basan en la comparación directa de las características de alternativas. Inicialmente se comparan las alternativas por pares en términos de cada criterio con el fin de confirmar el grado de preferencia (dominancia) de una relación con la otra para cada criterio concreto. A continuación, se agrega el grado de preferencia de los distintos criterios entre las alternativas con el fin de establecer el nivel de preferencia global de una sobre la otra.
- **Modelos basados en niveles de referencia o metas** (reference-level modeling) que buscan alternativas para alcanzar un nivel mínimo predefinido en cada criterio, basados en la programación lineal y programación por metas. Se trataría de determinar cuál es la alternativa que se acerca más a niveles predeterminados de resultados de cada criterio. La programación por objetivos implica minimizar las desviaciones de los objetivos teniendo en cuenta la importancia relativa de cada objetivo o criterio.

Aparte de estos métodos, existen otras metodologías no basadas en modelos formales, con métodos difusos y aproximativos. Además, las herramientas, enfoques y métodos para el desarrollo de cualquiera de estos instrumentos también son numerosas, existiendo aplicaciones comerciales y no comerciales. Todo ello compone una oferta muy amplia y variada de sistemas de apoyo, que han sido aplicados con fines muy diferentes.

La elección de la técnica para el análisis multicriterio es una decisión relevante y, dada la variabilidad de métodos disponibles, puede ser una primera decisión compleja, que dependerá de varios factores: los elementos a considerar en la decisión, la información disponible y los resultados que se pretenden obtener como apoyo en la toma de decisiones, por lo que es conveniente consultar guías que ayuden a seleccionar un método adecuado.

Para el análisis de tecnologías de tratamiento, en general, los modelos basados en medición del valor se ajustan bien. Dentro de estos, existen aproximaciones de diferente complejidad, siendo quizás los métodos multiatributo basados en teoría de valores (MAVT– Multi-Attribute Value Theory), los más sencillos y los que más se utilizan en la selección de tratamientos. Estos métodos proporcionan suficiente exhaustividad, robustez y sencillez metodológica para cumplir con el cometido de apoyar en la toma de decisiones sobre la selección de la tecnología más adecuada. Permiten estructurar el proceso de deliberación mediante la división de un problema en componentes e introducir los juicios de valor desde dos puntos de vista: respecto a la importancia de cada componente (peso) y respecto al grado de consecución de un atributo (puntuación). El valor estimado agregado se obtiene mediante la combinación de los pesos y las puntuaciones usando modelos matemáticos que pueden ser simples o complejos. Los resultados explicitan el impacto sobre la decisión de todos los criterios aplicados y la importancia relativa que alcanza cada uno.

El método de agregación de la información más utilizado en el estudio de alternativas de tratamiento es el aditivo (método de la suma ponderada). Se trataría de una agregación lineal simple, en la que cada puntuación obtenida en cada uno de los criterios se pondera por el peso de cada criterio, y esas puntuaciones ponderadas se suman obteniendo una calificación global de cada alternativa comparada. El empleo de modelos aditivos simples facilita la decisión, pero se basa en una serie de premisas teóricas:

- Requieren que no haya solapamiento entre los criterios valorados, para evitar un doble conteo.
- Deben poder determinarse y explicarse el peso de los criterios y las puntuaciones que se asignan, puesto que las puntuaciones y el peso responden a categorizaciones que muchas veces son cualitativas y deben transformarse en cuantitativas de algún modo.
- El uso de medidas o funciones para obtener un valor global implica aceptar que un mal resultado en un criterio se puede compensar con un mejor resultado en alguno de los otros. Una medida global puede no ser apropiada cuando estos efectos compensatorios no se consideran adecuados para el proceso de decisión.

A pesar de que este sistema sea el más empleado y aporte ventajas en muchas situaciones, no hay razón para descartar a priori la utilización de otros métodos. Así, como se ha dicho, en la selección de tecnologías en sistemas de agua y saneamiento, no es infrecuente establecer sistemas jerárquicos apoyados en los árboles de decisión, especialmente cuando se trata de situaciones muy controladas, en donde se pueden acotar claramente una serie de variables principales y establecer unas prioridades claras. En la figura 6 se muestra, como ejemplo, el sistema de selección jerárquico de sistemas de abastecimiento de agua propuesto en la guía *HDT N°89. Algoritmo para la selección de tecnología para el abastecimiento rural de agua* del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 2003).



Figura 6. Ejemplo de metodología de selección jerárquica de tecnología (CEPIS, 2003)

Por otra parte, se debe ser muy consciente de lo que los diferentes sistemas de análisis no pueden aportar. No existe un método universal, por lo que necesariamente se debe configurar un ADMC adaptado a cada caso. El análisis no decide qué criterios incluir ni el peso que debe tener cada uno de ellos en la decisión. La incertidumbre o la variabilidad puede ser diferente en cada caso, así como su consideración en el análisis de los resultados. Aunque existan guías temáticas que puedan servir de ayuda, las decisiones que se tomen para preparar el modelo de valoración siempre dependerán del juicio y conocimientos previos del que construye el modelo o bien, será resultado de los procesos de consulta con expertos, los interesados o la población en general.

Por todo ello, el análisis no debería reemplazar la toma de decisiones, sino solo facilitarla. Las metodologías que se puedan desarrollar permiten vislumbrar cuáles serían las opciones más favorables si los criterios incluidos fueran los únicos que tienen importancia y si las ponderaciones aplicadas reflejaran las preferencias de todos los interesados.

A pesar de todo ello, con la información que proporciona todo el proceso de evaluación de tecnologías y el análisis de los resultados del ADMC, se brinda al gestor o persona encargada de tomar decisiones una información muy valiosa. Además, como se ha dicho, aporta solidez a la decisión y transparencia, pues informa, tanto de los criterios que se han valorado, como de la importancia o peso que se ha dado a cada uno de ellos.

4.3 TAREAS EN EL DESARROLLO DE UN ANÁLISIS MULTICRITERIO

En la tabla siguiente se han identificado las tareas que es necesario llevar a cabo para realizar un análisis multicriterio con modelos de medición de valor. Esta relación se ha adaptado de la bibliografía para su aplicación en el problema concreto de la selección de alternativas de tratamiento. Generalmente en la literatura especializada se denominan “etapas del proceso”, pero en muchas ocasiones estas actividades no se pueden llevar a cabo de forma sucesiva, sino que unas alimentan a las otras, lo que se produce especialmente en el caso particular de análisis de alternativas en PTAR, por lo que se ha preferido la denominación de “tareas”.

Tabla 1. Tareas para el análisis multicriterio por modelos basados en medición de valores

TAREAS DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO	
1.	Establecimiento del contexto de la decisión
<hr/>	
2.	Definición los elementos del análisis
<hr/>	
A.	Los objetivos del proyecto.
B.	Las alternativas
C.	Los condicionantes locales
<hr/>	
3.	Recopilación de la información necesaria para valorar las alternativas
<hr/>	
4.	Construcción del modelo de decisión
<hr/>	
A.	Seleccionar y estructurar los criterios
B.	Asignar ponderaciones a los criterios
C.	Diseñar sistemas de valoración para cada criterio
D.	Establecer el sistema para agregar la información en un valor global
<hr/>	
5.	Obtención y análisis de los resultados
<hr/>	
A.	Puntuar los diferentes criterios para cada alternativa y calcular las puntuaciones agregadas
B.	Analizar la incertidumbre
C.	Interpretar y comunicar los resultados
<hr/>	

A continuación, se expone con carácter general el contenido, alcance y condicionantes de las diferentes tareas, concretándose en el capítulo 5 los requisitos y la metodología propuesta para el caso específico de la selección de alternativas de tratamiento.

4.3.1 Establecimiento del contexto de la decisión a adoptar

Cuando se enfrenta un estudio de alternativas, el primer paso sería determinar a dónde se quiere llegar con el estudio y quién debe intervenir en el análisis y en la adopción de la decisión. Esta reflexión es necesaria para identificar el método de análisis multicriterio que pudiera ser más indicado en el caso. Por tanto, se debería establecer:

- El tipo de decisión y de resultados requeridos.
- Decisores y agentes implicados Los grupos de interés que deben participar en la decisión (proyectistas, operadores, expertos, administraciones o entidades promotoras del proyecto, o interesados en general)

En el caso de un estudio de selección de alternativas de tratamiento el objetivo del análisis suele ser siempre el mismo: poder evaluar y clasificar las alternativas viables con objeto de identificar cuáles pueden ser las más adecuadas en el caso concreto. El tipo de resultados que se quiere obtener para ayudar a la decisión sería tanto una valoración independiente de cada uno de los aspectos que pueden ser importantes en esa decisión, como un indicador general, integrando toda la información, que permita identificar la alternativa mejor valorada. Sin embargo, los intervinientes en esa decisión pueden variar de un caso a otro. Como se ha mencionado anteriormente, la intervención de la población va a ser tanto más necesaria cuanto más pequeña sea la población y más básicos y sencillos los problemas planteados. Probablemente la población local tenga mucho que opinar y su opinión tenga un peso fundamental en un estudio de alternativas sobre soluciones en saneamiento básico en un núcleo rural o en la importancia que pueda tener los problemas de olores en su población, pero no va a tener conocimientos suficientes para decidir sobre soluciones tecnológicas complejas de tratamiento.

4.3.2 Definición de los elementos del análisis

Se debe conocer y estructurar el problema sobre el cual hay que tomar una decisión en todas sus dimensiones. El conocimiento del problema debería identificar, conocer y describir los siguientes aspectos:

A. Los objetivos del proyecto.

Describir las metas impuestas tanto sobre lo que se quiere lograr como sobre la manera en que se debe lograr.

En una planta de tratamiento el objetivo fundamental sería tratar el agua residual para llegar a los niveles requeridos, pero la forma en que esto se hace y las repercusiones que tiene también pueden formar parte de los objetivos del proyecto, como se verá más adelante.

B. Las alternativas

En el caso de los problemas de decisión multicriterio, las alternativas se definen como el conjunto de soluciones, estrategias, acciones, decisiones, etc., posibles que hay que analizar durante el proceso de resolución del problema de decisión que se considere.

Hay muchos problemas de decisión donde las alternativas a evaluar están prefijadas y no se requiere de ningún estudio para identificarlas, solo conocer en profundidad sus características y sus diferencias para saber cómo construir el modelo de decisión. Sin embargo, en el caso del estudio de alternativas en tratamiento se parte de un amplísimo universo de tecnologías con una enorme variabilidad, por lo que necesariamente habrá de realizar un análisis previo para reducir el número y facilitar el estudio, tal como se explicará en capítulo posterior.

C. Los condicionantes locales

En cada situación donde sea necesario adoptar la decisión existirán una serie de factores que pueden afectar a la decisión en relación con las alternativas a seleccionar. Entre ellos se pueden diferenciar:

- Condicionantes locales sobre el logro de los objetivos

- Condicionantes locales sobre las alternativas
- Condicionantes sobre otros aspectos, derivados de las posibles alternativas, que tienen incidencia en la elección.

A partir del análisis de los objetivos y de los condicionantes del problema se extraerán los factores a evaluar en el modelo.

Dependiendo del tipo de problema de decisión, la identificación de alternativas puede ser previa o posterior al planteamiento de los objetivos, a la selección de criterios o a la valoración de atributos. Incluso, como sucede en el caso de la selección de alternativas de tratamiento, puede tratarse de un proceso en varias etapas, donde se emplean algunos criterios para seleccionar las alternativas a valorar.

En muchas ocasiones, para poder conocer el problema en todos sus aspectos e, incluso, para poder concretar los objetivos, es necesario recabar previamente una información local. Este sería el caso del análisis de alternativas de tratamiento, especialmente si se realiza en el marco de los estudios de un plan director de saneamiento.

4.3.3 Recopilación de la información sobre las alternativas

En un planteamiento general, cuando las alternativas están prefijadas, esta etapa estaría dirigida exclusivamente a recabar la información necesaria para mostrar, de manera clara, cómo resuelve el problema definido y en qué difiere de las otras alternativas. Es decir, consistiría en recopilar datos sobre el comportamiento de la alternativa en cada criterio y resumirlas en una matriz de rendimiento (performance matrix).

Esta información se obtendría a partir de los valores que alcancen determinados atributos que presentan las alternativas (cuantitativos o cualitativos). Los valores de los atributos de cada alternativa se puntuarán posteriormente en cada uno de los criterios de valoración.

En el caso de la selección de alternativas de tratamiento, en el contexto de un plan director, se debe destacar que, además del conocimiento de las tecnologías, va a ser necesario también desarrollar estudios para obtener información sobre otros elementos del análisis, como sería la concreción de los objetivos del proyecto o de los factores locales.

4.3.4 Construcción del modelo de decisión

La construcción del modelo de decisión es un proceso complejo, que requiere de recursos para su estudio y diseño y un acuerdo y consenso importante por todos los implicados. Requiere la realización de cuatro subtarefas: (i) seleccionar los criterios que condicionan la decisión, (ii) asignar pesos a los criterios elegidos, (iii) establecer sistemas de puntuación para cada criterio y (iv) establecer el sistema de agregación de la información para obtener la evaluación final. Aunque estos cuatro elementos se analicen por separado, el sistema de valoración es el resultado integrado de las ponderaciones, los métodos de puntuación de cada criterio y el algoritmo de agregación, por lo que no pueden plantearse como tareas independientes sino interrelacionadas. Así, por ejemplo, los criterios no se ponderarán ni puntuarán de la misma forma si la fórmula de agregación es multiplicativa o es aditiva.

La repercusión final real de un criterio sobre la valoración general vendrá determinada por el peso asignado y por las diferencias relativas que presentan las alternativas para ese factor. Si un factor tiene mucho peso, pero luego no existen diferencias entre las alternativas, no influirá realmente en la decisión. Si un factor tiene un valor menor, pero luego es el único que presenta diferencias importantes entre las alternativas, podría determinar la decisión.

Dada la complejidad del proceso es conveniente emplear siempre medios informáticos de apoyo, como hojas de cálculo, que permitan introducir posibles modificaciones al modelo y volver a obtener los resultados de manera sencilla y rápida. Estas herramientas serán imprescindibles si a posteriori se pretende realizar un análisis de sensibilidad de los resultados. Asimismo, teniendo en cuenta los recursos que requiere realizar este tipo de análisis adecuadamente, al tener que construir un modelo específico en cada caso, resulta muy conveniente apoyarse en manuales o guías que ayuden en su preparación.

A continuación se analizan algunos aspectos importantes de cada etapa del modelo.

4.3.4.1 Selección y estructuración de los criterios

Como primera etapa en la construcción del modelo se deben identificar y acordar los criterios relevantes que van a tener incidencia en la selección y que permitan su evaluación para cada alternativa.

En general, los criterios que van a condicionar la decisión los conforman los objetivos del propio proyecto, a los que las diferentes alternativas han de dar solución, los condicionantes locales que pueden tener incidencia sobre el alcance de estos objetivos y sobre las alternativas y las posibles consecuencias asociadas a la tecnología seleccionada. En algunas publicaciones, incluso, se diferencia a los factores clave que deben formar parte del análisis en dos tipos: objetivos y criterios. La principal diferencia sería que los objetivos normalmente reflejan una dirección de preferencia, mientras que el criterio no lo hace.

Para algún tipo de decisión los criterios pueden ser prácticamente los mismos en todos los casos como, por ejemplo, si un particular quiere comprar un auto, el costo, el consumo, la estética, la fiabilidad o la comodidad serían criterios prácticamente universales para cualquier comprador. Sin embargo, en otros casos, como sucede en el tratamiento de aguas residuales, la situación puede cambiar mucho de un caso a otro y habrá que realizar un exhaustivo estudio de factores, siendo esta fase seguramente la más importante del estudio de alternativas.

Se debe recordar que los diferentes criterios en muchas ocasiones serán complementarios, pero a veces incluso pueden llegar a estar contrapuestos. El modelo de decisión tratará de incorporar todos ellos al proceso de toma de decisión de la mejor manera posible.

La identificación de los criterios más importantes en algunas ocasiones se realiza a priori, a partir del análisis general del problema (objetivos y condicionantes) y antes de conocer o plantear las alternativas. En otras ocasiones se lleva a cabo de forma contraria, se analizan unas primeras alternativas y se comparan para identificar las cuestiones que las diferencian y, a partir de las mismas, establecer el sistema de decisión. Pero en la mayoría de los casos se parte de un planteamiento mixto: se conocen una serie de objetivos y factores que la experiencia ha determinado que pueden ser más o menos comunes y se adaptan luego al problema concreto. Este último sería el caso de la selección de alternativas de tratamiento y con esta guía se pretende aportar unas recomendaciones en este sentido.

Tampoco es infrecuente, aunque generalmente depende del tipo de problema, que, para la selección de los criterios y su posterior ponderación, se cuente con grupos de trabajo formados por expertos y/o agentes interesados.

La primera identificación de criterios suele generar como resultado un listado con numerosos factores, algunos de ellos serán relativos a las mismas cuestiones o a cuestiones que se encuentran en el mismo ámbito y otros serán completamente independientes de los demás.

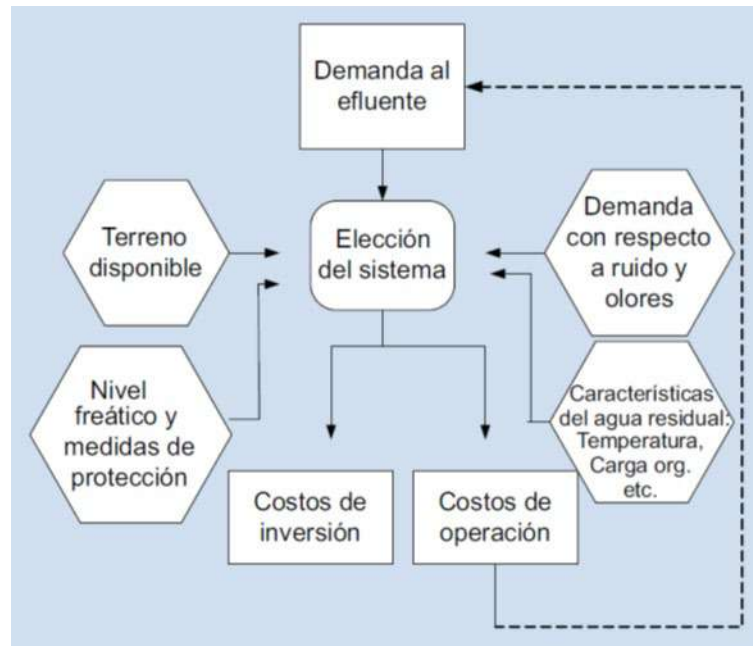


Figura 7. Ejemplo de esquema de análisis de criterios (Wagner, 2010)

Una vez identificados los criterios a valorar, su consideración en el modelo de decisión debería realizarse de la forma más estructurada posible, con el fin de tratar de aportar coherencia, claridad y sencillez al proceso, para lo que se recomienda la agrupación de los criterios temáticamente en lo que la bibliografía denomina “ámbitos”, “dominios”, “dimensiones” o “clúster”. Tanto los objetivos como los criterios pueden ser descompuestos en subobjetivos y subcriterios; además estructurando todos los objetivos y criterios en forma de árbol se ofrece una visión ordenada de los valores bajo consideración, es lo que se denomina árbol de valores (value trees). Este sistema de árboles aporta además una ayuda para evitar olvidar algunos aspectos que puede ser necesario evaluar dentro de un criterio. Los criterios agrupados o en árboles contendrán una serie de subcriterios, cada uno de los cuales, además de ponderarse para completar el valor del criterio, deberá identificarse con algún atributo o atributos que se puedan evaluar para obtener una puntuación.

La organización por árboles y la evaluación final a partir de clúster de factores requerirá de un paso intermedio en el modelo para obtener un índice de valoración de cada grupo (que podrá realizarse por algún tipo de media u otro método si se considera más adecuado). En los capítulos 5 y 6 se realiza un profundo análisis de los factores a considerar en la selección de tecnologías de tratamiento y de la utilización de árboles de valores, de tal manera que se organicen de manera jerárquica.

La selección de criterios debería seguir una serie de buenas prácticas, como son:

- Ser exhaustiva o integral: Los criterios seleccionados deberían cubrir de la forma más amplia posible todos los aspectos que tienen incidencia en la selección o, dicho de otra forma, todos objetivos y los ámbitos relacionados con el problema que son pertinentes para la selección.
- Evitar la redundancia entre criterios para evitar la doble contabilidad, que estaría sobrevalorando un aspecto.
- Se debe buscar la simplicidad y mesura en el número de criterios, más que la complejidad.
- Se debería tratar de reducir el número de criterios a considerar en la decisión final, por lo que se deberían tratar de agrupar temáticamente.

Por su parte, los criterios seleccionados deberían tener, en la medida de lo posible, las siguientes cualidades:

- Independientes: Cada criterio debe contribuir al resultado o beneficio con independencia de los demás. Evitar los solapamientos
- Relevantes: Evitar introducir criterios que sean intrascendentes para la decisión
- Explícitos: Importante para poder explicar la toma de decisiones (transparencia y rendición de cuentas)
- Concisos: referidos a un único aspecto
- Comprensibles por todos los participantes en el proceso.
- Operativos: que puedan ponderarse y puntuarse en base a algún atributo

Asimismo y para que sean operativos los criterios, los atributos a medir en las alternativas deberían también reunir ciertas características, como son:

- Claridad y precisión sobre el concepto que representan, evitando la ambigüedad. Descriptivos de las características de cada opción a valorar
- Cubrir todo el rango de consecuencias.
- Relación lo más directa posible con las consecuencias que se quieren evaluar.
- Comprensibles por los participantes en el proceso
- Operativos: que puedan medirse

Como en el resto de las etapas, el proceso de selección de criterios debe fundamentarse en un profundo conocimiento sobre los objetivos, los condicionantes locales y las alternativas a estudiar, por lo que nuevamente se llama la atención sobre la importancia de los estudios de previos señalados en la tarea anterior.

4.3.4.2 *Asignación de pesos a los criterios*

Como ya se ha comentado, los modelos permiten estructurar el proceso de deliberación no solo porque dividen un problema en componentes sino, también, porque introducen los juicios de valor del decisor desde dos puntos de vista: respecto a la importancia de cada componente (peso) y respecto al grado de un atributo (puntuación).

La incidencia que un criterio tiene en la valoración final de una alternativa vendrá determinada por el producto del valor de la puntuación por el peso. Y la importancia global que un criterio va a tener en la decisión final de un caso concreto va a venir determinada por la amplitud del rango de los resultados obtenidos para las distintas alternativas. Por muy importante que a priori pueda ser un factor, si no existen diferencias significativas en ese criterio entre las diferentes alternativas, no tendrá incidencia en la evaluación. Estas reflexiones ayudan a entender que el concepto de “importancia” y su traducción en la ponderación puede establecerse desde perspectivas diferentes en un análisis de alternativas. Por una parte, se podría valorar la importancia de cada factor partiendo del análisis del problema, tratando de medir la importancia de cada factor sobre la solución del mismo. Por otra, se puede valorar desde abajo, una vez realizadas las mediciones de cada atributo y constatadas las diferencias que presentan, se establecen los pesos que esas diferencias deberían tener en la decisión final. Esta segunda opción se centra básicamente en destacar las diferencias existentes entre las alternativas y no en valorar la bondad de cada una para resolver el problema general. Bajo esta perspectiva, si no hay diferencias importantes dentro de un criterio, podría incluso descartarse del proceso de selección, en el entendimiento de que no aporta información útil para la discriminación. Esta perspectiva permitiría una aproximación metodológica más sencilla, puesto que simplemente mediría las diferencias de los valores de los atributos de las distintas alternativas en cada criterio y lo que realmente traslada la importancia de esas diferencias a la decisión final sería el peso. Tiene el inconveniente, sin embargo, que toda la carga subjetiva se traslada a la determinación de ese peso y no se acaba de separar en dos

decisiones. En estos casos necesariamente los pesos se han de establecer después de puntuar los atributos en cada criterio.

En un estudio de alternativas como es el de las tecnologías de tratamiento, sin embargo, no solo interesa discriminar cuál es la mejor, sino que interesa conocer también cómo se comporta cada alternativa frente al problema en general y frente a cada factor importante y, en el caso de que las valoraciones de las alternativas sean muy similares, constatar esa similitud será un resultado más útil que destacar las pequeñas diferencias que puedan existir. Por tanto, en general, en un estudio de alternativas de tratamiento debería optarse por la primera opción. Con esta perspectiva sí se lograría claramente la separación de la decisión en sus dos términos: la selección de los factores y sus pesos relativos constituirían la plasmación del problema completo, mientras que las puntuaciones se ceñirían a puntuar la incidencia que pueden tener las diferentes alternativas sobre cada factor.

Este tipo de reflexiones realmente debería realizarse en la primera etapa del proceso, cuando se identifica el tipo de resultados que se quiere obtener para optar por un método de apoyo a la decisión, pero se han trasladado a este punto para que se puedan comprender mejor.

Para llevar a cabo una ponderación desde la primera perspectiva, se pueden encontrar diferentes propuestas metodológicas en la bibliografía, siendo una de las más habituales el método de asignación directa, en el que el decisor asigna discrecionalmente valores a los pesos. Esta asignación puede llevarse a cabo de diferentes formas, como son: por ordenación simple, por tasación simple, o por comparaciones sucesivas. Es posible también la comprobación de la consistencia de las ponderaciones asignadas mediante métodos sofisticados. Este es el caso del Proceso Analítico Jerárquico (Saaty, 2008) donde se pondera mediante la comparación por pares, basándose en la premisa de que el cerebro humano está especialmente bien capacitado para comparar dos criterios o alternativas entre sí, pero menos cuando tiene que hacer comparaciones múltiples, de esta forma se puede asegurar que las ponderaciones asignadas son coherentes.

Otras aproximaciones para obtener los pesos parten de planteamientos menos estructurados. Si se cuenta con un grupo de expertos o se quiere tomar en consideración las diferentes perspectivas de los distintos actores puede realizarse a partir de promediar los valores propuestos por los diferentes agentes. Estos procesos pueden estar guiados en mayor o menor grado y complementados por las metodologías anteriores.

Se debe tener presente que la importancia de cada criterio no es algo innato del mismo, sino que es algo instrumental introducido para condicionar una decisión. Por tanto, lo que realmente se debería tratar de calibrar, cuando se establecen los pesos, es en qué medida un determinado factor ha de condicionar la decisión. Este es un aspecto esencial pero muchas veces no se tiene en cuenta, aplicando metodologías con las que se pretende alcanzar un resultado objetivo. Por ejemplo, un sistema típico de ponderación consiste en clasificar los criterios seleccionados en una serie de categorías de importancia, asignándoles valores de una escala (ej. 1 a 5). Sin embargo, este sistema presenta dos carencias: No se comparan unos criterios con otros, para verificar que realmente todos los de la misma categoría deberían tener el mismo peso y no se contrasta la importancia de cada criterio sobre la decisión final. De hecho, la importancia real de cada factor sobre la decisión final va a depender del número total de criterios adoptados. Si, por ejemplo, la componente económica se piensa que es muy importante en la decisión y que debería suponer un 25% del peso en la misma, esta importancia no se debería ver disminuida porque se considere un número mayor de criterios.

Por otra parte, se ha de tener en cuenta que la importancia que cada factor debería tener en la decisión es algo subjetivo de cada observador y dependerá de la forma en que le afecte el problema. Por tanto,

en un problema que afecte a diferentes interesados de manera distinta, es fundamental que el resultado se obtenga de un proceso de deliberación con los agentes que participan en la decisión y muy probablemente será necesario introducir una iteración, comparando las sucesivas propuestas hasta llegar a un reparto de pesos más adecuado y consensuado.

Lo ideal sería que cada uno de los agentes implicados estableciera un procedimiento lógico y estructurado para determinar los pesos que a su juicio deberían tener los criterios y, a partir de los mismos, tratar de llegar a un acuerdo de los pesos en la decisión. La determinación de los pesos puede depender de aspectos externos o internos locales y en ocasiones también va a requerir de información y conocimiento de las condiciones locales.

Dada la importancia de este punto en la construcción del modelo, en el siguiente capítulo se analizará nuevamente en detalle para su aplicación en el tratamiento de aguas.

4.3.4.3 *Diseño de los sistemas de valoración de cada criterio*

La medida del alcance o consecución, cualitativa o cuantitativa, asociada al criterio o al objetivo es el atributo. Por tanto, el atributo operativiza el uso del criterio o del objetivo con la medida de cuanto se alcanza.

Cuando se realiza el análisis de criterios y su agrupación, en ocasiones no se diferencia claramente entre lo que sería un subcriterio y los atributos de las alternativas a valorar. Incluso se pueden encontrar referencias en la bibliografía donde se habla de que un criterio puede valorarse por diferentes atributos. Sin embargo, lo que realmente se estaría haciendo es valorar un aspecto o criterio general, a partir de una serie de subcriterios a los que agrupa. Cada uno de estos subcriterios o factores responderá a un atributo específico de las alternativas. La diferencia entre ambos conceptos sería que un atributo identifica y mide una característica específica de la tecnología (cuantitativa o cualitativamente), mientras que la puntuación del criterio valora la incidencia de esa medida sobre la decisión. Esta valoración se realiza asignando a las variaciones del atributo una puntuación o escala común. Sin embargo, puesto que en muchos casos se emplean las mismas categorías para medir un atributo y para valorarlo, en ocasiones se confunden los conceptos y los términos.

Los atributos en los que se basan las valoraciones de las alternativas respecto a cada criterio deberían reunir idealmente las características que se expusieron al final del epígrafe 4.3.4.1

Las funciones de valoración o puntuación de los atributos pueden construirse usando tres opciones:

- **Técnicas de puntuación directa.** Implica la toma de decisiones sobre la forma de las funciones de valor, si se incrementan de forma monótona (el valor más alto es el más preferido), decrecen de forma monótona (el más bajo valor es el más preferido) o de rango no monótono (un atributo intermedio sería el más preferido).
- **Técnicas indirectas.** En general asumen una función monótona e implican plantear una serie de cuestiones no cubiertas mediante la consideración de diferencias en la escala de atributos y su relación con la escala de valor. Por ejemplo, se pueden establecer categorías para diferenciar entre los niveles del atributo. De esta forma se puede construir un modelo cuantitativo, basado en juicios cualitativos y analizando las inconsistencias, para pasar de un modelo ordinal a un modelo cardinal.
- **Técnicas en dos partes o técnicas de indiferencia.** Exploran la magnitud de los incrementos en la escala de atributos, identificándolos con incrementos de unidades en la escala de preferencias. De esta forma, estiman puntos sobre la escala de atributos que sirven como punto medio o central en la escala de valores.

Aunque pueden existir criterios con atributos medidos en continuo en su propia unidad de medida, será necesario categorizar ordinalmente para poder ajustar las variaciones del atributo medido a sus repercusiones. En la figura 8 se muestran ejemplos de valoración hipotéticos

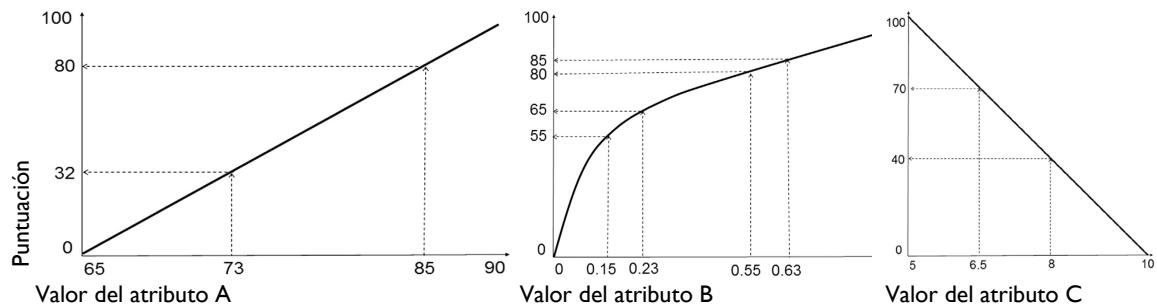


Figura 8. Ejemplos de funciones de puntuación de criterio (Thokala et al., 2016)

Es importante destacar que para cada uno de los factores que integran un ámbito, deberá identificarse algún atributo de las alternativas que permita su valoración (deben ser operativos). Sin embargo, los criterios generales o ámbitos no responden a un atributo concreto sino a los factores que integra y para su valoración deberá preverse un sistema que aglutine toda la información de esos factores en un único valor. Por lo general, en esta evaluación de cada ámbito suele emplearse el mismo sistema de agregación elegido para el estudio general, pero no tiene por qué ser necesariamente así.

4.3.4.4 Definición del sistema de agregación de la información

Finalmente se requiere la obtención de un índice de valor global que represente la valoración de cada alternativa y oriente la decisión. La elección del método de agregación es relevante, dado que determina el resultado del modelo. El método por el que se vaya a agregar la información debería ser tenido en cuenta al establecer el sistema de ponderación y los sistemas de puntuación de los criterios, debiéndose definir el modelo matemático de forma conjunta en todos sus pasos.

Dentro de los modelos de medida de valor multiatributo pueden utilizarse diferentes métodos de agregación para la combinación de puntuaciones y pesos y, en concreto, los métodos de estimación directa, que son los que generalmente se emplean en los estudios de alternativas de tratamiento, suelen utilizar alguna de las siguientes técnicas:

- **Método aditivo.** Consiste simplemente en multiplicar cada puntuación en cada criterio por su ponderación y así calcular el valor de cada alternativa. Es de los más empleados, ya que tiene la ventaja de ser más fácil de entender y comunicar a los agentes participantes y a los decisores.
- **Método multiplicativo.** Es similar al método aditivo, pero en algunas ocasiones las puntuaciones se elevan a la ponderación de su correspondiente criterio o bien se tiene en cuenta las utilidades individuales de cada participante.

Cuando los criterios sean independientes en su desarrollo, es decir, si no existe interacción entre criterios, generalmente se preferirá el método aditivo. Si, por el contrario, existe una interacción o dependencia, entonces el método multiplicativo será más adecuado.

Box 2. Ejemplo de sistema multiplicativo. El marco de priorización en el PNTAR de Argentina.

En el Plan Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales (PNTAR) de Argentina se estableció un marco de priorización de actuaciones para la rehabilitación de plantas de tratamiento basado en la evaluación de los impactos y beneficios de las actuaciones. Como no se disponía de información precisa de los impactos, se partió de una serie de indicadores que permitieran obtener una medida del riesgo de que esos impactos se estén produciendo y, por tanto, de los beneficios que se podrían lograr al remodelar cada PTAR. Para ello se utilizaron una serie de factores que se agruparon en tres ámbitos:

- Impactos potenciales. Incluye una serie de indicadores sobre los impactos (sociales, sanitarios y ambientales) que se podrían estar generando en cada caso por una mala situación de las infraestructuras y los beneficios sociales de realizar la actuación, como son: nivel de pobreza de la población; distancia entre las instalaciones y la población; distancia del punto de vuelco al abastecimiento más próximo y características del cuerpo receptor.

Cada tipo de impacto posible se valoró en una escala común, siendo el resultado final del ámbito la suma de todos ellos.

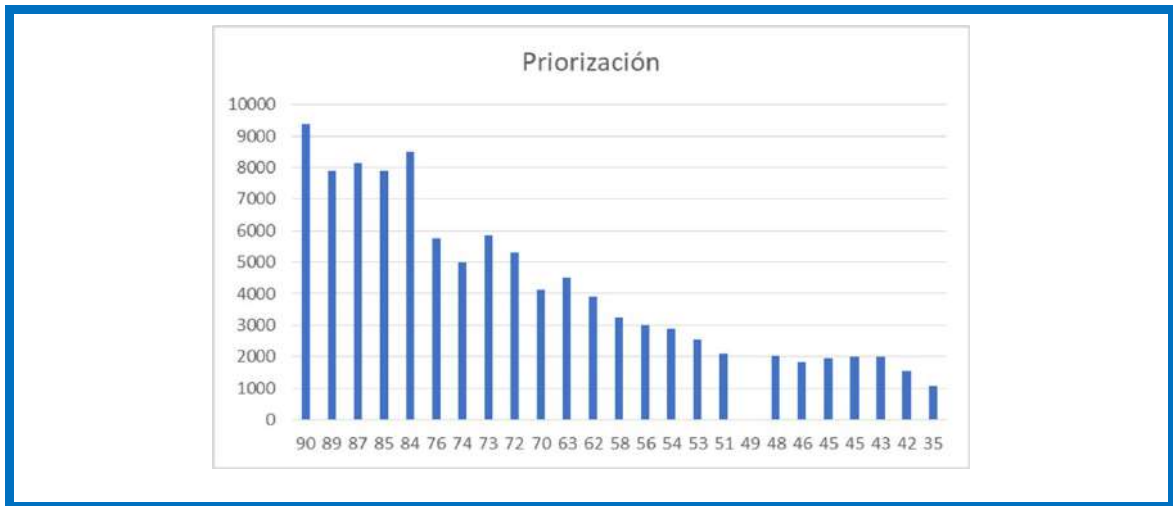
- Estado de infraestructuras. Incluye los indicadores sobre el estado de la instalación; la vida útil transcurrida y el nivel de sobresaturación, así como sobre la calidad de la operación. Internamente el valor del ámbito se obtiene por adición del valor de los factores.

Este ámbito representaría el estado en que se encuentra cada instalación y, por tanto, la probabilidad de que los impactos identificados en el ámbito anterior se estén produciendo realmente o que se van a producir a corto plazo si no se actúa.

- Tamaño de la instalación. Este ámbito representaría la magnitud de los impactos que se pueden generar. La población se transformó en unidades logarítmicas para poder comparar poblaciones de tamaño muy diverso y atender a la necesidad de apoyar a las pequeñas poblaciones.

En este caso se vio que, dentro de cada ámbito, la suma de factores ofrecía la mejor valoración del aspecto a valorar. Sin embargo, la evaluación de los posibles riesgos y beneficios de una actuación se obtendría de una manera más adecuada por el producto de los posibles impactos por la probabilidad de que se produzcan, debido al mal estado de las instalaciones, y por su magnitud. Por tanto, el método de agregación seleccionado fue el multiplicativo.





4.3.5 Obtención y análisis de resultados

No solo es importante saber construir un modelo de decisión adecuado, también lo es saber interpretarlo y explicar los resultados, así como ser consciente de la incertidumbre del análisis, para que el tomador de decisiones pueda evaluar adecuadamente los resultados de este análisis.

4.3.5.1 Cálculo de las puntuaciones y su agregación

Con el modelo construido, a partir de la información obtenida de cada alternativa y del conocimiento de su respuesta a los factores en las circunstancias locales, se podrá realizar el ejercicio de valoración de las diferentes alternativas para cumplir con el proyecto.

Para cada alternativa se determinarán los valores de los atributos que se consideran en el sistema. A partir de estos valores y de los sistemas de puntuación creados para cada factor, se obtendrán las valoraciones de cada alternativa para cada criterio. Además, tras su ponderación e integración por el método seleccionado, se obtendrá un indicador general de valoración de la alternativa.

Los resultados del modelo de ayuda a la decisión lo constituyen tanto los resultados obtenidos para cada factor ponderado como el resultado general global, porque ambos niveles aportarán una información útil para el decisor.

4.3.5.2 Análisis de incertidumbre

Se ha de tener en cuenta que inevitablemente este análisis tiene unas incertidumbres, que van a depender tanto del conocimiento base de la situación y las alternativas, como del propio modelo de valoración establecido. Como se ha dicho, los sistemas de ayuda a la decisión no son modelos predictivos. Estos procedimientos tratan de reducir los posibles sesgos, dividiendo un problema complejo en partes más pequeñas, donde los aspectos a valorar se reducen y se pueden abordar de una manera más sencilla y transparente, pero la subjetividad del que valora sigue entrando en cada una de esas casillas. Además, la selección y ordenación de los factores fundamentales, así como la asignación de pesos, estará condicionada por el grupo decisor que configura el modelo.

Por todo ello, resulta conveniente, especialmente en aquellos problemas más complejos, donde intervienen más factores o donde la decisión tenga repercusiones mayores, bien por el costo del

proyecto o por las afecciones que genera, tratar de realizar un análisis de sensibilidad del sistema de valoración para determinar la robustez de los resultados obtenidos.

Existen diferentes técnicas también para apoyar estos análisis de sensibilidad, aunque dependiendo del número de criterios manejados y de los propios resultados del modelo deberá valorarse la necesidad de acometerlo y la profundidad del estudio.

Por ejemplo, en el caso de la selección de tratamiento de aguas residuales, si hay dos alternativas que están claramente muy por encima de las demás y con valores más próximos entre ellas, un análisis de sensibilidad probablemente no alterará la posición de las tecnologías menos valoradas, pero quizás sí me aporte información útil sobre las que son más similares. Por ello interesará dirigir el análisis de sensibilidad para valorar la incertidumbre de la elección entre esas dos opciones más cercanas.

Generalmente los análisis de sensibilidad se realizan generando nuevos escenarios en los que se varían los pesos de los factores y las puntuaciones de los atributos y evaluando si los resultados en la priorización de alternativas varían y en cuantos casos. El análisis se puede centrar en aquellos factores que tengan más repercusión en la valoración final, oscilando sus pesos y los sistemas de valoración en unos rangos por encima y por debajo de los valores fijados.

De realizarse un análisis completo, donde todas las ponderaciones varíen en un rango razonable de valores, en lugar de aplicar un único valor constante, los resultados serán más sólidos, pero requiere de la obtención de un número muy importante de resultados y de su posterior análisis estadístico.

4.3.5.3 Interpretación y comunicación de resultados

Los ADMC y específicamente los de estimación directa aportan, como se ha comentado, un doble nivel de información útil, por una parte, la valoración de cada uno de los factores importantes que ha de tenerse en consideración en la decisión y por otra un índice de valoración general.

El índice general, como cualquier medida de tendencia central, será un valor más representativo de una situación general, cuanto menos contradicción exista entre los criterios valorados y menos variabilidad exista entre los resultados obtenidos. Cuando se pretenden alcanzar objetivos que pueden resultar contrapuestos (por ejemplo, ocupar poca superficie y tecnologías sencillas de operar) o si los resultados de las valoraciones arrojan resultados muy dispares (una alternativa es muy buena en unos criterios pero muy mala en otros) y realmente no se pueda decir que exista una complementariedad entre esos factores (el trastorno que supone un mal resultado en un factor no se compensa por uno bueno en otro), realmente la situación es demasiado compleja para que un único valor la pueda representar de manera adecuada. Por esta razón, en la gran mayoría de los problemas multicriterio se debe evitar considerar este resultado global como algo que representa la generalidad, solo representa que la suma de todos los factores analizados es mayor o menor.

Los responsables de decidir pueden usar estos resultados, en combinación con los análisis de sensibilidad, para constatar las diferencias y similitudes entre alternativas, clasificarlas y tomar las decisiones sobre el problema.

También en el de exposición de resultados conviene también emplear un software que permita la presentación de resultados en forma clara en forma de tablas y gráficas. Si se considera que se ajusta más a la realidad del problema mostrar los resultados independientes de cada factor en lugar o además del índice general, existen tipos gráficos que resultan muy útiles para reflejar los resultados.

En los modelos aditivos ponderados el sistema más común de representación lo constituyen lo que se denomina las matrices de resultados, donde para cada alternativa se refleja el resultado de la valoración

de cada criterio (puntuación multiplicada por el peso) y la puntuación del índice general. Con ello se puede apreciar la importancia relativa de cada factor en las valoraciones finales. En la figura 9 se muestra el esquema de una matriz multicriterio de valoración o decisión con todos sus elementos.

		Alternativas						
		A_1	A_2	...	A_i	...	A_m	
Criterios y pesos asociados	C_1	P_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1i}	...	a_{1n}
	C_2	P_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2i}	...	a_{2n}
	Valoraciones		...	...
	C_j	P_j	a_{j1}	a_{j2}	...	a_{ji}	...	a_{jn}

	C_n	P_n	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{ni}	...	a_{nn}

Figura 9. Matriz multicriterio

5 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE TRATAMIENTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Una vez conocidos los aspectos básicos y las utilidades que ofrecen los sistemas ADMC, en este capítulo se aplican al problema de la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales y se propone una metodología básica para su estudio.

Con frecuencia, un mismo problema de tratamiento de aguas se puede abordar con soluciones técnicas diferentes y la selección del tratamiento más adecuado sólo se conseguirá si se consideran todas las alternativas posibles y se evalúan todos los criterios que pueden afectar a dicha selección, ponderando de forma apropiada la importancia relativa de los mismos en cada proyecto (MARM, 2010). Sin embargo, en ocasiones la decisión sobre la línea de tratamiento a implantar se toma sin una reflexión adecuada, basándose simplemente en la experiencia, conocimiento y opinión subjetiva del decisor o decisores. En otras se plantean metodologías de análisis mal concebidas, sin contemplar todos los aspectos relevantes y con una elevada carga de subjetividad.

En los siguientes apartados se expone en detalle la metodología propuesta para realizar el estudio de alternativas de tratamiento, partiendo de las tareas identificadas en el capítulo anterior y de las recomendaciones que allí se realizan. Los dos primeros apartados examinan el contexto de la decisión a adoptar y la definición del problema a solucionar. En el apartado 5.3 se destaca la importancia de obtener la información necesaria para el estudio, tanto de las condiciones locales como de las tecnologías de tratamiento, si bien la información de detalle sobre estos se incluye respectivamente en los anexos 1 y 2 por tratarse de un contenido muy voluminoso. En el apartado 5.4 se expone brevemente el modelo de decisión propuesto y del 5.5 al 5.8 se detallan los elementos más relevantes que lo componen. Finalmente, en el apartado 5.9 se incluyen las recomendaciones para la obtención de los resultados y su análisis.

Complementariamente a este capítulo, el capítulo 6 incluye una revisión detallada de los principales criterios o factores a tener en cuenta cuando se realiza un estudio de alternativas de tratamiento. En el mismo se expone cómo partiendo de la información sobre las condiciones locales y las tecnologías se puede realizar la ponderación y valoración de cada factor.

5.1 CONTEXTO DE LA DECISIÓN A ADOPTAR

En el capítulo 3 se expuso el contexto de los estudios en el que se aborda el análisis de alternativas de tratamiento, qué es lo que le influye y a qué otros estudios debería condicionar. En este capítulo se trata de definir más el contexto de la decisión en sí, qué tipo de información se va a analizar, qué resultados se pretende alcanzar con el ejercicio, quién va a intervenir en la toma de decisiones y en qué medida; todo ello con objeto de determinar cuál sería la metodología adecuada y los modelos que se deben construir.

En cualquier caso, el contexto descrito en el capítulo 3 también es importante para determinar qué tipo de análisis se puede o debe hacer. Por ejemplo, la selección de tecnologías de tratamiento puede desarrollarse en un contexto en el que, muchos de los factores de los que depende, se estén estudiando en esos momentos, dentro del mismo proyecto. Por tanto, es importante que, cuando se programen las tareas que deben abordarse en un proyecto, se tengan en cuenta las necesidades del análisis de alternativas, tanto en lo que se refiere al alcance de los trabajos como a su programación en el tiempo.

Por otra parte, si el análisis se encuentra dentro de un plan director que desarrollará todo el saneamiento en lugar de un proyecto solo de PTAR, el estudio presentará un grado de incertidumbre mucho mayor, dado que muchas de las variables fundamentales para definir el problema, como puede ser las características del agua residual, no podrán ser más que una estimación. En estos casos, el estudio del problema en sus objetivos y condicionantes debería tener en cuenta también los posibles riesgos que se generen por las incertidumbres del conocimiento.

Asimismo, se debe recordar que, durante la elaboración de un plan director de saneamiento, las posibles soluciones de tratamiento deberían condicionar a otras decisiones que se están adoptando en paralelo, como por ejemplo la selección del terreno para ubicar la PTAR. Por ello, un análisis preliminar del problema, donde se consideren solo los factores más importantes (costos de operación y superficie ocupada, por ejemplo) y las tecnologías por grupos (diferenciando intensivas y extensivas), puede ser muy útil para introducir este factor en las otras decisiones. Una vez adoptadas aquellas, ya se podrá abordar el estudio de alternativas de tratamiento definitivo en todos sus detalles.

La idoneidad del tipo de modelo de apoyo en la decisión que se vaya a adoptar va a depender del contexto específico. Por ejemplo, en determinados programas de inversión con poblaciones de tamaños similares y un contexto físico y socioeconómico muy predecible, podrían resultar adecuados simples arboles de decisión que planteen las soluciones básicas idóneas para esos contextos. Si bien, siempre hay que tener en cuenta que, en un proyecto de tratamiento de aguas residuales, las características locales tienen tal grado de influencia en la solución que, por lo general, va a ser muy arriesgado tratar de extrapolar resultados de una población a otra por muy similares que parezcan ser al principio.

En la adaptación de la metodología de análisis multicriterio para la selección de líneas de tratamiento de aguas residuales habrá que tener en cuenta varios aspectos:

- A diferencia de otras decisiones de distinta naturaleza, donde los criterios pueden estar más tasados, aquí pueden variar muy significativamente de un contexto a otro, por lo que será necesaria una reflexión profunda para identificar los criterios a utilizar y su importancia, basada en los objetivos y riesgos del proyecto y en el contexto existente.
- Dado que las alternativas de tratamiento pueden ser innumerables, para poder ser operativo en el estudio, es necesario realizar una reducción previa del número de alternativas a valorar en el proceso detallado.
- Para poder conocer adecuadamente las características a evaluar de las líneas de tratamiento en el contexto local, será necesario realizar un diseño básico a las mismas.

Para llegar a la selección de la alternativa es preciso tener en cuenta que, aunque se utilice un método multicriterio de apoyo, que aporte una mayor transparencia y objetividad a la decisión, es imposible eliminar totalmente la componente subjetiva del proyectista. Por esta razón, si es posible contar con el juicio de expertos será un método complementario muy útil para validar los pesos y los resultados obtenidos o, incluso, para reflexionar sobre si se ha aplicado la metodología de un modo suficientemente riguroso.

Se debe tener también en cuenta que no siempre tiene por qué haber una única solución que se considere adecuada, pudiendo encontrarse varias líneas de tratamiento perfectamente válidas para el contexto estudiado. Por ello, en muchos casos, el resultado de la valoración general podrá ser muy similar para varias alternativas. En estas circunstancias la decisión final la debería determinar la preferencia del futuro operador de las instalaciones.

A partir de todas estas consideraciones, se ha propuesto una metodología flexible y eminentemente práctica, basada en el conocimiento de los tratamientos y de las condiciones locales, a través de la identificación de criterios, su ponderación y evaluación en matrices multicriterio, que se expondrá detalladamente en los siguientes apartados. Los principales elementos y relaciones de la metodología propuesta se esquematizan en la figura 10 del apartado 5.4.

Para poder realizar la evaluación con el mayor rigor posible será necesario un conocimiento exhaustivo del contexto y el problema a solucionar, que permita identificar adecuadamente todos los criterios y ponderar su influencia, así como un buen conocimiento de las posibles líneas de tratamiento. Una vez que se dispone de la información necesaria, se podrán seleccionar las alternativas a estudiar, construir el modelo y valorar las alternativas adecuadamente.

Actores interesados o afectados por la decisión

Entre los interesados en la construcción de la planta de tratamiento se pueden diferenciar: los futuros usuarios del servicio en general (domésticos y actividades económicas); el futuro operador de las instalaciones; los vecinos próximos a la instalación de tratamiento que podrán verse afectados por molestias directas; las administraciones locales, regionales y nacionales; los promotores que financian el proyecto (si no es ninguna de las administraciones ni el prestador); la consultora que realiza los estudios de ingeniería; las autoridades reguladoras de los servicios; las autoridades medioambientales generales y las que protegen el medio receptor. Respecto al papel que deben jugar los interesados se pueden introducir las siguientes reflexiones:

- **Autoridades ambientales y sanitarias responsables de la protección de las aguas y del control de las instalaciones de tratamiento.** Estas autoridades representan el interés general y, por tanto, a otras poblaciones y actividades económicas, así como al medio ambiente hídrico, que se puedan ver afectadas por el vuelco del efluente. Su intervención en el proceso de decisión se articula a través de las leyes y la normativa técnica que establece el marco en el que se debe plantear la solución. Es decir, establecen límites al vuelco o reúso del agua tratada, así como a la calidad de los lodos generados y su disposición. El peso de estos actores es absoluto porque transforman sus requerimientos en factores limitantes y objetivos a cumplir por el proyecto. En consecuencia, la intervención de estos agentes en el proyecto se limitará a comprobar que sus reglas se han cumplido para otorgar la autorización ambiental de la descarga, aunque si intervinieran en la discusión evidentemente darían la mayor parte del peso en la decisión a la mejora de la calidad en los parámetros de salida.
- **Autoridades ambientales en general.** Además del control de los efluentes y los lodos, desde una perspectiva ambiental pueden ser de interés general otros objetivos, como la limitación en la emisión de gases de efecto invernadero, la eficiencia y neutralidad energética o la recuperación de residuos. En algunos países más desarrollados la regulación del tratamiento de aguas ya empieza a introducir estos conceptos, por lo que allí se les da la misma consideración que a las normas de vertidos o de lodos. En otros muchos, sin embargo, todavía no se han regulado de manera específica, si bien están alcanzando cada vez más importancia y se van integrando en los estudios de evaluación de impacto ambiental. Puesto que la participación de las autoridades ambientales en cada uno de los procesos de decisión no es posible, mientras no esté regulado, el consultor que lleve a cabo los estudios debería hacer ver a los demás agentes que se ha de tener en cuenta también esta posición y que será obligada en el caso de que el proyecto vaya a someterse posteriormente a una evaluación de impacto ambiental.

- **El promotor del proyecto.** El financiador del proyecto puede no ser una administración local ni nacional. Su intervención puede limitarse a la financiación o puede asumir un papel protagonista contratando directamente los estudios del proyecto e incluso las obras a realizar. En ocasiones la financiación estará compartida entre el prestador y/o la administración local y otros agentes (una administración regional o nacional, bancos de desarrollo, agencias de cooperación internacional, etc.).
- **Entidades responsables del proyecto.** Sean o no las financiadoras, en todo caso, deberían estar presentes en las decisiones estratégicas del proyecto tanto el prestador como la administración local. El prestador puede ser una entidad independiente de la administración local o incluso una entidad supramunicipal con una sede ajena a la población.
- **Usuarios.** Su participación podrá ser directa o a través de sus representantes, dependiendo en general del tamaño de la población y de la complejidad del problema. En ocasiones pueden tener capacidad para contar con sus propios técnicos o asesores que les ayuden en la supervisión del proyecto. Además, en determinados países y regiones las estructuras administrativas formales, como la municipalidad o los distritos, no son las únicas estructuras sociales que dirigen una población, sino que puede haber otras organizaciones paralelas con sus propios líderes que responden a su cultura o religión, por lo que, si el debate se lleva a nivel de población, deberán poder participar también en el proceso de decisión.
- **Afectados.** Puede haber un grupo de usuarios que, por su cercanía a la PTAR, van a ser susceptibles de sufrir las molestias que pudiera generar la instalación. Este grupo de vecinos y actividades deberían poder ejercer su derecho a estar presentes en el proceso como un agente interesado diferente al de los usuarios en general, puesto que sus necesidades van a ser muy distintas de las que pueda tener el común de los usuarios.
- **Identificación de roles en el desarrollo del proyecto y la prestación del servicio.** Como se ido viendo, dependiendo de cómo sea la situación local y de cómo se articule el proyecto, puede haber una coincidencia de roles en un agente determinado. Por ejemplo, la administración municipal de la población puede ser a la vez el prestador del servicio y el promotor de la obra. En otras ocasiones la responsabilidad de la prestación y/o desarrollo de infraestructuras recae en instituciones regionales o nacionales. Cuando el mismo prestador es el que realiza la obra resulta muy conveniente que en proyecto intervenga también el departamento de operación y no solo el de obras.

5.2 ELEMENTOS DEL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Los elementos de referencia del estudio de alternativas serán, por una parte, los aspectos conforman y definen el problema y, por otra, las alternativas existentes para solucionarlo. Para facilitar su comprensión se han dividido en tres grandes grupos:

- **Los objetivos del proyecto,** en este caso de las instalaciones de tratamiento, y las estrategias previstas para el desarrollo de las obras.
- **Los condicionantes locales,** que tendrían incidencia sobre el logro de los objetivos, así como sobre las alternativas de tratamiento y sus consecuencias.
- **Las alternativas de tratamiento,** que será necesario conocer para poder discernir cuales son las líneas de tratamiento que mejor se adaptan a estas circunstancias.

En este apartado se abordan las dos primeras cuestiones, habiéndose llevado el estudio detallado de las tecnologías de tratamiento, por su extensión y especificidad, al anexo II.

Los objetivos del proyecto y las condiciones locales se deben estudiar cuidadosamente. Cuando no se ha prestado la suficiente atención al contexto o a los objetivos de un proyecto, en ocasiones, tras haber realizado el estudio de alternativas, se ha advertido que varias de las líneas estudiadas e incluso la seleccionada no cumplían con alguno de los objetivos del proyecto, lo que invalida por completo el estudio realizado.

Cuando se analizan estos elementos, se debe tener en cuenta también que existen incertidumbres y que puede haber riesgos que en el futuro modifiquen tanto los condicionantes locales como los objetivos del proyecto y las estrategias de desarrollo.

5.2.1 Objetivos del proyecto

Como a cualquier tipo de infraestructura, lo primero que se debe exigir a una planta de tratamiento es que cumpla con la función para la que se construye, que será reducir la contaminación de las aguas residuales hasta el nivel establecido como objetivo. Pero, además, como ya se ha dicho, una PTAR no es un fin en sí mismo sino un instrumento; el fin es la prestación del servicio de tratamiento y la planta un elemento necesario para ello. Por tanto, los objetivos del proyecto y de las instalaciones necesariamente han de ser también los objetivos del servicio.

En este apartado se incluyen una serie de consideraciones sobre el establecimiento de los objetivos en una PTAR, pero se deben tomar como exclusivas, ya que las singularidades de cada proyecto podrían requerir de cuestiones adicionales.

Objetivos técnicos de las instalaciones

Los objetivos vendrán, en principio, preestablecidos por la entidad promotora del proyecto, si bien es habitual en los proyectos de agua y saneamiento que se consensuen con los distintos actores implicados y se concreten a partir del conocimiento de las circunstancias locales. Los objetivos técnicos que ha de conseguir una planta de tratamiento se pueden resumir en una serie de cuestiones:

- **Los objetivos del tratamiento.** Los logros que una instalación debe alcanzar en el tratamiento de las aguas vienen acotados por lo que se denomina las bases de partida del proyecto. En las bases de partida se sintetizan las características de las aguas residuales a tratar, y los resultados obtener en el efluente de salida y en los lodos generados. En esencia, determinarían las entradas y salidas de la instalación y serán los elementos fundamentales a considerar para la configuración de las alternativas (líneas de tratamiento propuestas y diseños de los procesos unitarios).

Las características del agua residual serán un resultado de las condiciones locales, mientras que los objetivos de calidad vendrán impuestos en el proyecto, aunque puedan terminar de concretarse con los estudios previos, en función de la sensibilidad del medio receptor.

Al establecer los objetivos de la instalación generalmente lo que se hace es determinar la eficacia requerida de tratamiento a través de:

- Umbrales a alcanzar, en concentración y/o en porcentajes de reducción, de los contaminantes presentes en el agua residual, teniendo en cuenta que:
 - Dependerá de si las aguas descargan al medio o se reúsan (todo el caudal o una parte)
 - La seguridad de alcanzar estos niveles dependerá de la fiabilidad de la estimación de las características del agua a tratar y de su evolución

- Hay ocasiones donde puede ser necesario alcanzar niveles más estrictos de los impuestos en la normativa general de descargas, como pueden ser las siguientes:
 - El medio receptor es especialmente sensible y con la normativa general no quedan suficientemente protegidos los ecosistemas o los usos que se realizan aguas abajo.
 - Existe una probabilidad elevada de que se revise la normativa de descargas y evolucione hacia requerimientos más estrictos durante la vida útil de la instalación.
- Requisitos sobre los residuos generados y, en especial, respecto a los lodos producidos, tanto en calidad como en cantidad.

Además de la eficacia para alcanzar los niveles requeridos, sería deseable que un proyecto estableciera también objetivos sobre la eficiencia de la instalación (menor utilización de recursos; en línea con la sostenibilidad económica y ambiental) e, idealmente, de seguridad, esto es, que la eficacia y la eficiencia se consigan en cualquier situación (con capacidad de afrontar y superar los riesgos previsibles).

En el estudio del problema es importante comprobar, antes de realizar el estudio de alternativas, que las condiciones locales no vayan a modificar los objetivos preestablecidos. Esto, aunque parezca una obviedad, no siempre se realiza en el orden adecuado, generando trastornos importantes en el desarrollo del proyecto. Un caso típico donde a veces se comete este error es cuando no existe un medio receptor cercano donde se pueda descargar el efluente tratado y el estudio de alternativas se realiza sin tener resuelto este aspecto. Una vez finalizada la selección, se confirma que no queda otro remedio que llevar las aguas tratadas a reutilización o a infiltración en el terreno, pero entonces la línea de tratamiento seleccionada no es válida y debe volverse a acometer el estudio de alternativas.

- **Otros requisitos de las instalaciones.** Como se ha dicho, es cada vez más frecuente que los proyectos de tratamiento vayan dando más importancia a la consecución de otros objetivos relacionados con la sostenibilidad ambiental, como podrían ser:
 - Relacionados con los efectos sobre el cambio climático
 - Minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la operación de la PTAR.
 - Minimizar el consumo energético.
 - Relacionados con la economía circular
 - Recuperar energía a partir del biogás
 - Recuperar residuos como, por ejemplo, la valorización del lodo con su utilización en agricultura o la recuperación del fósforo como estruvita.
 - Reutilizar las aguas, lo que permite mejorar la gestión de los recursos hídricos y aprovechar los nutrientes.
 - Potenciar sinergias con otras actividades de la zona en lo relacionado al tratamiento y valorización conjunta de residuos o en el aprovechamiento del calor residual o del biogás generado.

Desarrollo previsto de las instalaciones

La configuración de las instalaciones del proyecto no solo va a estar condicionada por el logro de todos estos objetivos sino también por el modo en que se pretenden alcanzar. Por tanto, junto con los objetivos, la definición del problema debería contemplar también el desarrollo previsto en el

saneamiento de la población y en la propia instalación de tratamiento, en especial si se pretende construir por fases y ha de constar con varias líneas de proceso. La necesidad de imponer etapas en la construcción de la planta y, sobre todo, las dimensiones que debe tener en cada una de las fases, muchas veces se determinará en los propios estudios previos del proyecto.

La definición de la estrategia de desarrollo de las instalaciones estará condicionada por diferentes cuestiones, muchas de las cuales ya se han expuesto en el capítulo 3. Como se vio allí, las decisiones que se adopten al respecto condicionarán las características de las aguas y, por tanto, las bases del proyecto.

Objetivos de sostenibilidad del servicio

Aunque la sostenibilidad es algo que cada vez se tiene más en cuenta, resulta una perspectiva algo limitada plantear el problema en términos de “construir plantas de tratamiento y lograr su sostenibilidad”, como si se tratara de una tarea adicional a las infraestructuras, porque realmente se trata de algo más inherente a la solución adoptada. Un servicio público tiene como finalidad atender a las necesidades de la sociedad y está en su propia naturaleza que la prestación sea continuada y sostenible en el tiempo. Por tanto, una instalación solo será válida como instrumento del servicio si va a permitir la prestación continuada y si no lo permite, simplemente, no debería considerarse ni siquiera una alternativa.

Formalmente, se puede decir que la sostenibilidad del servicio se debe entender en varias facetas: la sostenibilidad técnica, la económica, la social, la institucional y la ambiental, que van a ser interdependientes. A continuación se detallan los principales aspectos considerados en cada faceta (adaptado de Mauriño Morales, 2021):

- **La sostenibilidad técnica** de los proyectos de agua estará basada principalmente en que el prestador pueda realizar el mantenimiento físico, funcional y operativo de la infraestructura construida. Dependerá de las capacidades de los operadores del sistema para hacer frente al costo, el consumo energético y la complejidad de la operación y mantenimiento de las instalaciones, determinados a su vez por la solución adoptada, su diseño y construcción.
- **La sostenibilidad social** depende de la concientización y compromiso de la sociedad con el proyecto. La posición de los usuarios frente al tratamiento de aguas residuales no es igual que para otros elementos del ciclo urbano del agua. La necesidad de agua de abastecimiento es innata; el drenaje de pluviales se demanda para evitar los problemas que las inundaciones generan; el sistema de saneamiento aliviará los problemas sanitarios; sin embargo, el tratamiento de unas aguas residuales no beneficia al usuario que ha de sostener el servicio, sino al medio ambiente y a otras personas ubicadas aguas abajo. Por ello, muchas veces es necesario crear esa demanda y generar un compromiso de los usuarios con el proyecto, para que estén dispuestos a sostenerlo económicamente y para que demanden al prestador y a sus autoridades que el tratamiento se realice de la forma adecuada. Además, en el mantenimiento de este compromiso van a ser también importantes las posibles molestias o impactos que las instalaciones puedan provocar sobre la sociedad (olores o ruido por ejemplo), tanto sobre la vida cotidiana de los vecinos, como sobre las actividades económicas (especialmente el turismo), por lo que una adecuada sostenibilidad técnica condicionará también la social.
- **La sostenibilidad económica** se alcanza cuando la prestación continuada del servicio está económicamente garantizada. Existe un solapamiento con la primera faceta y vendrá condicionado por la segunda. La continuidad del servicio va a requerir del soporte económico

del mantenimiento y operación de las instalaciones, del sostenimiento del propio ente prestador y de la reposición de activos de las instalaciones cuando vayan llegando al final de su vida útil. En un servicio que ha de prestarse a través de instalaciones que pueden ser complejas y costosas, la economía de escala es un factor fundamental. El modelo de descentralización local adoptado en muchos países plantea un difícil reto a los servicios de tratamiento para ser económicamente sostenibles en las pequeñas poblaciones, cuando los recursos provienen exclusivamente de sus tarifas o de las fuentes de financiación externas que puedan conseguir. Es esencial tomar en cuenta estos factores y los anteriores en la selección de alternativas. En general, la opción más sostenible, desde el punto de vista de la prestación continuada, será aquella que requiera menos costos y sea menos compleja en la operación y mantenimiento.

- **La sostenibilidad ambiental** conlleva que la gestión de los servicios no solo se hace atendiendo a las necesidades actuales y concretas del proyecto, sino también tomando en cuenta las necesidades de las generaciones futuras y del medio ambiente en general. Las instalaciones de tratamiento son una medida esencialmente dirigida a evitar un efecto negativo sobre el medio ambiente y sobre los recursos, pero las soluciones viables para lograrlo pueden, a su vez, tener un mayor o menor impacto desde un punto de vista global. El consumo energético o la generación de gases de efecto invernadero serían dos ejemplos destacables en esta faceta. La reducción de los posibles impactos para potenciar su sostenibilidad ambiental debería incluirse entre los objetivos de la instalación y podrán entrar en conflicto con las facetas anteriores.
- **La sostenibilidad institucional** vendría condicionada por la estabilidad en la estructura organizativa del prestador, que permita una continuidad en la calidad de la prestación del servicio, condicionada a su vez, en muchos casos, por las variaciones de los representantes en instituciones locales y por la estabilidad política, institucional y legislativa a nivel país. Esta estabilidad en las condiciones institucionales y normativas es quizás la que menos tiene que ver con la selección de la tecnología. Su efecto fundamental se produciría en el nivel de incertidumbre y de riesgo de cambio que introduce en los factores que condicionan el tratamiento y, por tanto, puede afectar a las demás facetas.

Para poder asegurar que se puede alcanzar una solución sostenible en cada proyecto, incluso en las poblaciones con menos recursos, se debería contar con un marco regulatorio y de planificación planteado sobre estos mismos objetivos. La sostenibilidad del servicio debería guiar la planificación sectorial nacional, la planificación regional y el plan director de la población.

Como resumen de este apartado se podría decir que la mejor solución de tratamiento de aguas residuales será aquella que cumpla con los objetivos establecidos por el proyecto, asegurando en la mayor medida posible la sostenibilidad del servicio en sus diversas facetas y adaptándose a las circunstancias locales.

5.2.2 Condicionantes locales

El contexto local ha de tenerse en cuenta en la selección de la tecnología porque condiciona tanto las bases de partida y los objetivos, como los procesos de tratamiento y la forma en que se pueden construir y operar las instalaciones. Los condicionantes locales pueden ser de tipologías muy diferentes, como se muestra en la siguiente relación:

- **Características de las aguas residuales a tratar.** Como se ha dicho, en conjunto con los objetivos de calidad a obtener, constituyen las bases de partida del proyecto. En concreto interesará conocer:
 - Caudales: Valores medios, máximos, mínimos; variaciones semanales, estacionales y en momentos de lluvia.
 - Contaminantes típicos de las aguas residuales domésticas: concentraciones y cargas diarias y sus variaciones.
 - Presencia de otros contaminantes de aportes no domésticos.
 - Otras posibles entradas de efluentes y contaminantes en la planta, como pueden ser los lodos procedentes de los sistemas individuales.

Todas estas características están condicionadas por el modelo de desarrollo del saneamiento en la población y en la planta de tratamiento (parte de la población incluida en la red de saneamiento, inclusión de zonas industriales, fases de ampliación en la red y en la PTAR, inclusión de aguas pluviales, etc.).

- **Características de las instalaciones existentes.** Estado de las instalaciones de abastecimiento, saneamiento y drenaje de pluviales. Condicionarán a su vez las características del agua residual.
- **Características ambientales.** Principalmente las características que más pueden influir en el tratamiento de las aguas y de lodos, como la temperatura, la altitud y la pluviometría.
- **Condicionantes generados por la ubicación de la población y de la PTAR.** Entre ellos se encontrarían:
 - Límites normativos de vertido en los cuerpos de agua próximos a la PTAR.
 - Disponibilidad de terreno para la construcción de la PTAR y su costo
 - Distancia entre el terreno de la PTAR y asentamientos o zonas especialmente sensibles
 - Alternativas de disposición de lodos. Demanda de lodo como fertilizante o como enmienda orgánica en zonas próximas.
 - Disponibilidad de materiales de construcción
 - Disponibilidad de servicio técnico y de repuestos de equipos electromecánicos habituales en los procesos de PTAR.
- **Características del terreno de la PTAR**
 - Superficie disponible
 - Características topográficas y geotécnicas del terreno
 - Nivel freático e inundabilidad
- **Características del prestador**
 - Capacidad de la entidad operadora (recursos económicos y personal capacitado)
- **Posicionamiento de la población frente al proyecto**
 - Compromiso de la población con el proyecto, que condiciona tanto la exigencia del servicio adecuado al prestador como su disponibilidad a pagar.
 - Experiencias insatisfactorias con plantas de tratamiento que puedan influir en su posicionamiento.

Cada uno de estos condicionantes será diferente en cada caso y los estudios previos del proyecto deben permitir conocer lo más correctamente el contexto existente. Además, tal como se expuso en el capítulo 3, el propio desarrollo del proyecto influirá en muchos de estos condicionantes, especialmente cuando van a construir las redes de saneamiento a la vez que la planta. Tanto el capítulo

6, como el anexo I ahondan en las repercusiones de estos condicionantes y en la obtención de información sobre los mismos.

5.2.3 Alternativas a valorar

Las alternativas a valorar estarían constituidas por los diferentes medios con los que se puede solventar un problema específico. En este caso serían las diferentes tipologías de instalación que, en las condiciones locales, son capaces de depurar los contaminantes presentes en el agua residual hasta alcanzar los niveles exigidos en el efluente de salida y en los lodos generados. Las alternativas disponibles podrían ser innumerables, como se puede ver en el anexo II, por lo que antes de entrar en la valoración de las alternativas va a ser necesario reducirlas a un número más operativo. Las recomendaciones para realizar esta preselección se expondrán en un apartado posterior. En este apartado solo se quiere precisar lo que constituye una alternativa en este proceso de análisis, puesto que se han visto casos donde se confunde este concepto.

Líneas de tratamiento

La línea o tren de tratamiento se conformará por la sucesión de tecnologías o procesos unitarios que, en su conjunto será la responsable de lograr la solución al problema. En una PTAR siempre se deberá implantar una línea de agua, formada por un pretratamiento y un tratamiento o sucesión de tratamientos posteriores que deberán ser suficientes para, partiendo de las características del agua residual, llegar a los objetivos que se imponen al efluente de la planta. Tradicionalmente se suele hablar de tratamientos primarios y tratamientos secundarios, aunque no siempre se pueden diferenciar en estos términos. Además, suele disponer también de una línea de tratamiento de lodos, que puede ser más o menos sofisticada dependiendo de la producción y estado de los lodos procedentes de la línea de aguas. Con la línea de lodos se lograrán los objetivos de sequedad, estabilidad y, en su caso, higienización, exigidos para el lodo. Adicionalmente y en función de los objetivos específicos del proyecto, la línea de agua podría contar con tratamientos terciarios de desinfección o de eliminación adicional de nutrientes, o con tratamientos cuaternarios en el caso de que se requiera la eliminación de microcontaminantes. Las plantas más avanzadas que prevean también la valorización energética contarán con una línea de biogás con diversos procesos donde se acondicionaría y/o utilizaría el biogás producido. Obviamente, el tipo de elementos que componen las alternativas a valorar en cada caso vendrá determinado por el logro de todos los objetivos definidos en el proyecto.

Se debe tener en cuenta que la naturaleza de las distintas etapas del tratamiento y la influencia de unas sobre otras aconseja que la evaluación de la línea de tratamiento se haga siempre conjuntamente, al menos en las etapas de proceso con las que se logra el objetivo de remoción de materia orgánica y nutrientes (pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario asociado a eliminación de nutrientes en la línea de agua y línea de lodos). El análisis de alternativas realizado de manera independiente para cada una de las etapas de tratamiento, que realizan algunos técnicos, se considera una mala praxis. Los rendimientos globales se logran con la línea completa y el dimensionamiento y los rendimientos que pueda o deba tener cada una de las etapas de proceso va a depender de las etapas anteriores y posteriores. Asimismo, la producción y las características de los lodos generados van a depender de la combinación de los procesos de la línea de aguas y de lodos. Por tanto, las alternativas a comparar deben ser líneas completas de tratamiento y esto tiene que quedar claro desde el inicio del estudio.

Solo las etapas de desinfección o de tratamiento cuaternario, en algunos estudios podrían valorarse independientemente si las relaciones con los procesos anteriores son poco relevantes. Si bien es cierto

que en otros casos no se pueden separar puesto que en el mismo tratamiento secundario se alcanzaría la desinfección (sistemas de Lagunaje o biorreactores de membranas-MBR, por ejemplo).

Una vez preseleccionadas las alternativas viables, la evaluación de su adecuación en cada criterio, puede depender tanto de la línea completa como del comportamiento de alguno de los elementos de proceso incluidos en el tren de tratamiento. En el capítulo 6 se podrán ver ejemplos de ambas situaciones.

Grado de definición de las líneas a valorar

Para muchas tecnologías y líneas es posible optar por diferentes modalidades que varían entre sí ligeramente siendo todas ellas viables. Por ejemplo, en una pequeña población donde se está planteando una línea basada en filtros percoladores, se podría optar por instalar en cabecera un tanque Imhoff o una fosa séptica, que son dos tipos de tratamiento de decantación y digestión del lodo.

Si se incluyeran todas estas posibles modalidades en el estudio, probablemente el resultado de la evaluación sería muy similar, si no igual. Por tanto, considerar por separado todas las posibles pequeñas variaciones que se puedan dar, probablemente no aporte más que una complejidad añadida innecesaria en el estudio. La selección de una u otra modalidad podría razonarse a posteriori, una vez se haya seleccionado el tipo de línea de tratamiento.

En cualquier caso, será el criterio del técnico encargado de la selección de alternativas, a la vista de los factores de valoración identificados, el que deberá evaluar si las diferencias entre estas modalidades son lo suficientemente significativas como para que sean consideradas conjuntamente o como líneas diferentes.

5.2.4 Incertidumbres y riesgos

En muchos casos puede ser difícil llegar a la concreción precisa de todos los aspectos que componen el problema, puesto que pueden existir indeterminaciones o riesgos de variación en algunos condicionantes que impidan poder acotarlos completamente. Así, por ejemplo, si la red de saneamiento ya está construida y no es previsible que la población experimente un crecimiento ni que vea modificadas sus actividades económicas en mucho tiempo, a partir de campañas debidamente planificadas de tomas de datos se podrá llegar a un conocimiento bastante preciso de las características del agua a tratar. Sin embargo, si la planta se va a construir a la vez que la red de saneamiento y/o la población está evolucionando rápidamente, aunque se puedan hacer estudios para tratar de estimar de la manera más acertada posible las características del agua a tratar, siempre habrá un riesgo de error. Otros riesgos que introducirían incertidumbre sobre los condicionantes serían, por ejemplo, si puede haber cambios en el prestador como consecuencia de cambios políticos en la población o si se prevé que vaya a haber un cambio en la normativa que modifique la exigencia sobre los vertidos o que introduzca obligaciones respecto a otros factores (normas de calidad de lodos, requerimientos de eficiencia energética, etc.).

No se puede pretender que en la fase del estudio de los elementos del análisis se determine una relación exhaustiva de todos los riesgos que puedan presentarse y quizás carezca de sentido hacerlo, porque pueden afectar a aspectos muy diversos que intervienen en todo el proceso de decisión. Sin embargo, sí se debería procurar ir identificando todas las posibles fuentes de incertidumbre según se avanza en el estudio y, en su caso, tenerlas en cuenta (por ejemplo, condicionando los diseños de las alternativas, o aumentando o reduciendo la importancia de un factor específico).

5.3 OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN NECESARIA

Como ya se ha destacado, es necesario obtener información detallada sobre aspectos muy diversos para todos los elementos que intervienen en el proceso de decisión, pudiéndose diferenciar en dos grandes grupos

- Alternativas de tratamiento
- Condiciones locales y definición de objetivos

En lo que respecta a las alternativas de tratamiento, además de recabar información sobre las capacidades y virtudes de cada tecnología, va a ser necesario realizar un estudio específico que permita conocer cómo se adaptaría cada una de ellas a las circunstancias locales. La realización de un prediseño de las posibles soluciones permitirá estimar el valor de algunos de los atributos de los criterios más importantes en la valoración. Los detalles con respecto a la información requerida y el prediseño a realizar de las líneas se recogen en el anexo II.

De la misma manera, para poder conocer los factores y las condiciones locales también en muchos casos va a ser necesario realizar estudios específicos (geotécnicos y topográficos, por ejemplo). Por la importancia de estos estudios previos y su influencia en la evaluación de las alternativas se ha incluido también el anexo I, donde se incluyen una serie de recomendaciones al respecto.

5.4 PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE DECISIÓN

Como ya se ha comentado, en estas recomendaciones se propone un estudio basado en un doble proceso:

- Una selección previa de las alternativas a valorar.
- Un modelo de decisión para valorar las alternativas seleccionadas, basado en las recomendaciones establecidas en el capítulo anterior

En ambos casos se partirá del análisis de los factores que pueden condicionar el problema. La figura 10 representa de manera esquemática los pasos principales que componen la metodología completa propuesta para realizar el estudio de alternativas de tratamiento.

La metodología parte del análisis e identificación de los factores que han de tenerse en cuenta en el proceso de selección. Algunos de estos factores podrán tener un carácter limitante para algunas alternativas, por lo que se emplearán en la selección previa de alternativas. En los apartados 5.5.1 y 5.6 se desarrollará este aspecto concreto. Otros criterios se considerarán solamente en el modelo de decisión para valorar las diferentes alternativas. En ambos casos es necesario identificar los atributos de las alternativas por las que se pueden valorar dichos criterios.

En lo que respecta a la construcción del modelo de decisión, la primera tarea consistiría en estructurar los factores por ámbitos o criterios generales, de tal forma que se pueda valorar adecuadamente la importancia de cada uno de ellos sobre la decisión final. Esta agrupación probablemente va a depender de las circunstancias locales y los intereses de los decisores al respecto, En el apartado 5.5.2 y en el capítulo 6 se aportarán detalles y recomendaciones al respecto.

Posteriormente será necesario ponderar los criterios generales en función de su importancia. En esta ponderación se deberán tener en cuenta los objetivos definidos para la PTAR y los riesgos existentes en el proyecto, así como las diferentes perspectivas de los agentes interesados. Dada la importancia de este paso, en el apartado 5.7 se analiza en detalle todos los aspectos a tener en cuenta y en el capítulo 6 se introducen una serie de ejemplos y recomendaciones.

Adicionalmente se deberán identificar y medir los atributos de las alternativas con los que se van a evaluar los criterios y establecer sistemas de puntuación para cada uno de ellos. Para muchos de los factores que suelen ser más determinantes en la selección, la medida de los atributos pasa por realizar un prediseño de cada una de las líneas de tratamiento en estudio. En el anexo II se recogen las cuestiones relativas al conocimiento de las tecnologías y a la medición de los atributos, incluyendo los prediseños. En el apartado 5.8 se incluyen recomendaciones sobre los sistemas de puntuación de estos atributos para poder valorar las alternativas y en el capítulo 6 se detallarán ejemplos para cada factor.

La información de todos los factores que se incluyen en un ámbito o criterio general debe integrarse para obtener el valor del ámbito. En el apartado 5.8.2 se aportan unas reflexiones sobre diferentes opciones y situaciones que se pueden presentar.

La última etapa de modelo de decisión consiste en la determinación del algoritmo por el que se agrega la información de todos los criterios generales en un único valor general, que en este caso se propone un modelo aditivo (apartado 5.9).

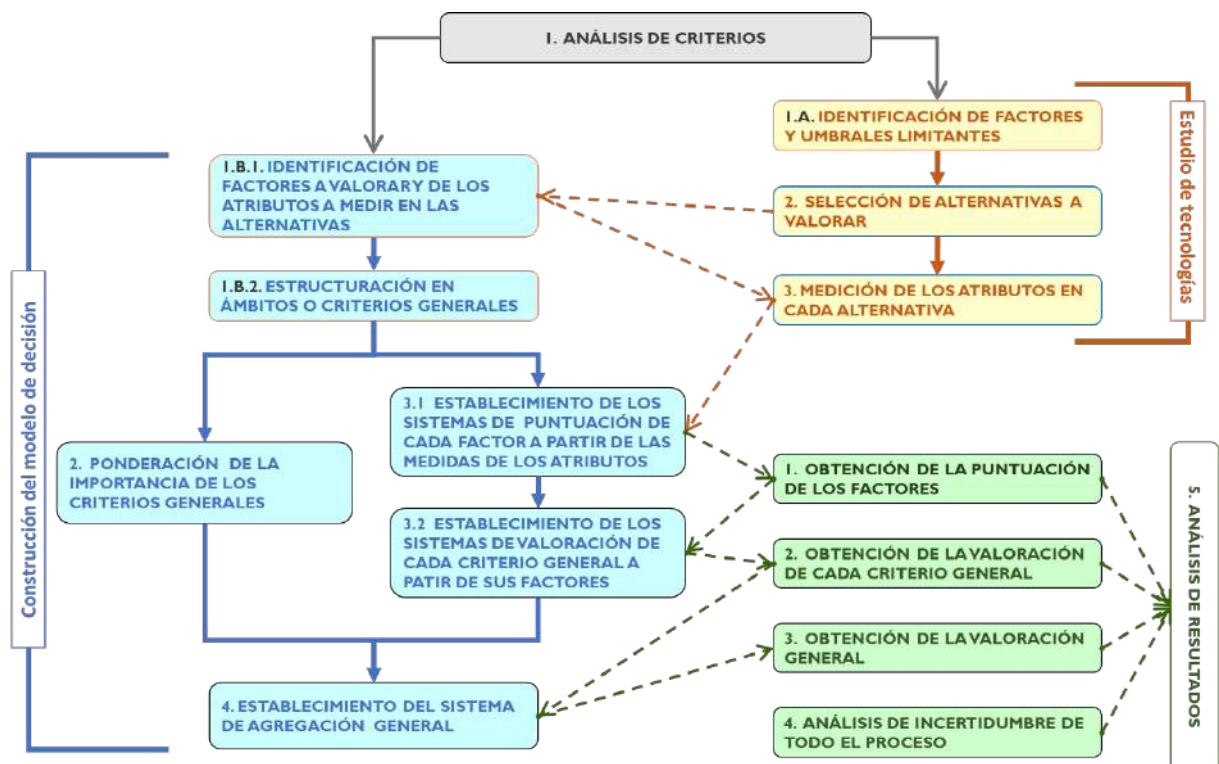


Figura 10 Metodología propuesta para la selección de alternativas

Una vez que se cuenta con el modelo construido, se puede valorar cada una de las alternativas seleccionadas. El apartado 5.10 aporta recomendaciones sobre a la mejor forma de realizar la puntuación de las alternativas, así como de evaluar los resultados obtenidos, destacando que, en muchas ocasiones, más importante que el valor general final van a ser los resultados parciales obtenidos para cada uno de los factores. Además, se introduce el análisis de incertidumbres como parte del análisis de resultados, que servirá para conocer la robustez del método y de las decisiones que se puedan adoptar a partir del mismo.

Es importante apoyarse en hojas de cálculo para construir el modelo, de tal forma que permita ir introduciendo con facilidad los cambios y ajustes que sean necesarios mientras se va consensuando

con todos los agentes y, una vez finalizado, permita la evaluación de las alternativas de forma ágil y sin errores y la realización de los análisis de sensibilidad necesarios.

Con fines didácticos, se ha desarrollado un caso práctico, incluido en el anexo III, en el que se aplica el método propuesto para un proyecto hipotético. En él se puede ver con detalle suficiente cómo se aplican las distintas etapas de la metodología en la práctica.

El éxito en la aplicación de esta metodología radicará, no tanto en el conocimiento de la misma, sino en la capacidad del técnico/planificador para establecer adecuadamente los criterios de valoración, así como su ponderación y la valoración de las distintas alternativas, frente a cada criterio de selección y para cada situación concreta.

5.5 ESTUDIO DE CRITERIOS

El estudio de los diferentes aspectos que puedan condicionar la decisión es la base del análisis multicriterio. Este estudio debe estar sustentado en un adecuado conocimiento de los objetivos del proyecto, de los condicionantes locales y de las alternativas y ha de conseguir:

- Identificar todos los factores que deberían tener incidencia en la decisión y los atributos por los que se puede medir la respuesta de las alternativas a estos factores.
- Determinar el papel que cada factor puede jugar en el proceso de estudio de alternativas:
 - Identificar factores limitantes y el rango de valores en los que cada uno de ellos impone una limitación a las diferentes alternativas.
 - Identificar criterios a valorar en el modelo de decisión, que pueden incluir también algunos de los limitantes.
- Agrupar los criterios de forma estructurada, con objeto de que se puedan valorar de la forma más adecuada y sistemática posible.
- Determinar el papel y la importancia de cada factor para llegar a la decisión:
 - Importancia que cada criterio general o ámbito sobre la decisión final.
 - Importancia que cada factor debe tener sobre el valor de su ámbito o grupo de criterios.

Además, los criterios que se consideren en el sistema de valoración deberían cumplir las características que se señalaban en el numeral 4.3.4.1.

El primer paso consiste, por tanto, en la identificación de todos aquellos aspectos que pueden tener incidencia en la decisión. Los factores se determinarán a partir del análisis de los objetivos del proyecto y los condicionantes locales. En los proyectos de tratamiento de aguas residuales la casuística puede ser muy diversa. Los objetivos y, sobre todo, las condiciones locales pueden variar mucho de un caso a otro, así como la importancia relativa de cada una de ellas en la decisión, por lo que los criterios también serán diferentes. Todo ello hace que la fase de selección de los criterios sea seguramente la más importante del estudio de alternativas.

Si una vez finalizado el estudio se detectara que un factor importante no ha sido tomado en cuenta, no debería tratarse de modificar la línea seleccionada para tener en cuenta esa circunstancia, sino que debería repetirse el estudio completo porque, muy probablemente, la solución seleccionada hubiera sido otra. Para evitar este tipo de trastornos, resulta muy conveniente contar con la opinión de expertos y apoyarse en guías especializadas.

Entre los criterios que condicionan la decisión hay una serie de ellos cuya influencia puede ser tan determinante que llegan a inhabilitar completamente una alternativa de tratamiento y, por tanto, se

utilizarán en la preselección de alternativas. Otros criterios tendrán un peso en la decisión, pero sin llegar a introducir una limitación absoluta por lo que serán considerados dentro del modelo de decisión. En algunos casos un mismo factor puede ser limitante para determinadas alternativas y a la vez ser importante en la valoración de las otras.

5.5.1 Criterios limitantes

Puede haber alternativas que en un caso concreto resulten muy ventajosas por muchos de los criterios identificados, pero que sean inviables porque no cumplen con los niveles mínimos exigidos en otro de ellos. Una adecuada identificación de estas limitaciones permitirá simplificar el proceso de selección, reduciendo el número de alternativas a evaluar, y evitará desperdiciar recursos estudiando líneas que no pueden ser elegidas. Por todo ello merece la pena realizar un análisis previo exhaustivo que permita identificar todos los criterios limitantes.

Aunque no es posible realizar un catálogo universal y es misión de los técnicos evaluadores su identificación en cada caso concreto, a continuación se exponen algunos de los casos más habituales:

- **Calidad del efluente tratado.** El cumplimiento de la normativa de vuelco o del objetivo de calidad que se haya impuesto a la PTAR constituye, quizás, el factor limitante más evidente. Si una línea de tratamiento no es capaz de alcanzar los límites marcados por la normativa de aplicación, no debería incluirse en el análisis. Dependiendo de la normativa de cada país se pueden imponer limitaciones a determinados contaminantes que resulten más difíciles de lograr y, por tanto, este factor será más restrictivo. Este sería el caso cuando se exige la reducción de amonio, de nitrógeno, de fósforo o de coliformes.
- **Requerimientos de otros objetivos del proyecto.** En el caso de que se hayan impuesto objetivos orientados a lograr una economía circular o de otro tipo, más allá de lo que son los requerimientos de tratamiento, podrán constituir también un factor determinante sobre las alternativas de tratamiento a plantear.
- **La superficie de terreno disponible** para la ubicación de la PTAR suele ser también un factor limitante. Cuando el terreno no es suficientemente amplio puede imposibilitar la implantación de las tecnologías extensivas. Dado que estas tecnologías pueden ser las únicas sostenibles en muchas circunstancias, la selección de la tecnología en esos casos debería determinar la selección del terreno y no al contrario.
En ocasiones puede haber disponibilidad de terreno, pero, debido a su alto precio, el costo podría limitar la superficie de la que se podría disponer. En este caso realmente el factor limitante sería el costo de implantación.
- **La temperatura.** La temperatura tiene una influencia muy importante sobre los procesos biológicos de depuración, que son necesarios para alcanzar elevados niveles de rendimiento. A bajas temperaturas se pueden ralentizar de tal manera los procesos que constituyen una auténtica limitación. En el caso de los tratamientos anaerobios el umbral donde esto sucede es más elevado que en los aerobios, por lo que estas tecnologías se verán limitadas en climas fríos.
- **Costos de implantación y de operación y mantenimiento.** La disponibilidad presupuestaria en los entornos socioeconómicos más desfavorecidos puede ser un limitante para hacer frente a los elevados costos de construcción y de operación y mantenimiento de determinados tratamientos muy sofisticados, por lo que podrían descartarse desde un inicio.

Además de los factores limitantes estrictos puede haber otros que, dependiendo de las circunstancias locales, a partir de unos niveles o rangos de valores, pueden imponer tal nivel de dificultades a la

aplicación de determinadas tecnologías que, a los efectos, se pueden considerar también limitantes. Entre los factores que más comúnmente pueden actuar de manera limitante se encontrarían los siguientes:

- **Las características de los terrenos disponibles** (topografía, geotecnia, nivel freático, etc.), que pueden llegar a dificultar o encarecer sobremanera la implantación de algunos tratamientos.
- **Otras características ambientales.** Además de la temperatura hay otras variables ambientales que, en determinados contextos extremos, pueden imponer tantas restricciones a determinados procesos que anulen claramente sus opciones como alternativa. Así, por ejemplo, los lechos de secado podrían ser poco operativos donde las lluvias sean muy frecuentes e intensas, salvo que se cubrieran, o los procesos que requieran una aireación forzada pueden resultar poco adecuados cuando la altitud sea muy elevada, como sucede en el Altiplano andino, porque su consumo energético se eleva mucho.
- **Los impactos sobre la población,** como olores, ruidos o impacto visual, en algunos casos pueden llegar a ser limitantes cuando el terreno asignado a la PTAR está situado en zonas residenciales o enclaves turísticos.
- **Operación y mantenimiento.** Los aspectos relacionados con la operación y el mantenimiento de las instalaciones pueden ser muy limitantes en el caso de poblaciones pequeñas que no disponen de recursos, ni de personal cualificado y precisan de tecnologías de baja complejidad técnica y de mantenimiento sencillo.

Posteriormente, en el apartado de selección de alternativas se verán una serie de ejemplos sobre cómo y dónde aplicar estos factores limitantes.

5.5.2 Criterios de valoración

Los criterios de valoración serán aquellos que se utilizarán en el modelo de decisión para la valoración de las líneas seleccionadas. Los factores que pueden tener una incidencia sobre la forma en que las diferentes líneas de tratamiento responden a un caso pueden ser muy numerosos y diversos, por lo que resulta imprescindible agruparlos con objeto de realizar un estudio de alternativas ordenado. En el apartado 4.3.4.1 se indicaron una serie de recomendaciones sobre la selección y estructuración de criterios que deberían ser tomadas en consideración.

Es conveniente puntualizar que en algunos casos la utilidad de los criterios limitantes se reduce a descartar las líneas que no serían viables, pero posteriormente no aportan nada en el proceso de valoración de las alternativas seleccionadas, por lo que no habrá que incluirlos. Por ejemplo, este sería el caso de la superficie de terreno disponible en la mayoría de los proyectos. Sin embargo, en otros casos el criterio limitante puede ser también relevante en la valoración, por ejemplo, si además de existir un límite de superficie, fuera conveniente ocupar lo mínimo posible porque el terreno tiene un costo de oportunidad elevado.

Sin la pretensión de poder abarcar todos los aspectos posibles, a continuación, se expone una relación de las cuestiones que más habitualmente se han de tomar en consideración para la valoración de las líneas de tratamiento en PTAR. Estos aspectos se han organizado en seis ámbitos o criterios generales que se expondrán en detalle posteriormente en el capítulo 6, donde se hará un análisis de los factores más habituales en la selección de alternativas en proyectos de PTAR. Si bien estos seis ámbitos y las cuestiones que en ellos se plantean pueden servir de orientación para la definición de los factores a considerar en el modelo de valoración y su estructuración, es importante tener en cuenta que tanto

los factores como la estructura más adecuados dependerán de las circunstancias del proyecto, de las condiciones locales y de los intereses de los agentes que intervienen en el proceso.

Dentro de cada ámbito se han ido identificando una serie de aspectos que deberían ser analizados, indicando si corresponden a los objetivos o condicionantes del proyecto, a las condicionantes locales o a riesgos existentes, y para cada uno de ellos las características a las que habría que atender para poder valorar las alternativas (atributo de la alternativa).

A. Condicionantes del tratamiento

Este ámbito abarca todos los aspectos asociados a la eficacia requerida en el proceso de tratamiento.

Aspecto analizado	Característica de la alternativa
1. Calidad requerida en el efluente tratado (objetivo del proyecto)	Rendimientos alcanzados por la línea de tratamiento
2. Requisitos para los lodos (objetivo del proyecto)	Rendimientos alcanzados por la línea de lodos
3. Previsión de cambios normativos en cuanto a calidades requeridas (riesgos)	Adaptación de la línea de tratamiento a nuevos requerimientos normativos
4. Características del agua residual a tratar (condicionante local)	Adaptación de la línea de tratamiento
a. Valores medios, máximos, estacionales	Versatilidad de las instalaciones
b. Tipo de contaminantes de las aguas	Resistencia a tóxicos de los procesos
c. Variaciones bruscas en las características de entrada	Tolerancia a las variaciones de caudal y carga
4. Características ambientales (condicionante local)	Adaptación de la línea de tratamiento
a. Temperatura	
b. Altitud	
c. Pluviometría	

B. Condicionantes de la construcción

Los condicionantes de la construcción serían aquellos aspectos asociados a la ubicación de la PTAR que determinarán las posibilidades constructivas del proyecto y su complejidad. Estos aspectos incidirán en el costo de la construcción, pero también en su complejidad y, por tanto, en los plazos de ejecución de las obras.

Aspecto analizado	Característica de la alternativa
1. Superficie disponible (condicionante local)	Superficie ocupada.
2. Características constructivas de los terrenos (condicionante local)	Tipología de cubas y reactores de la instalación
a. Topografía	Extensión y disposición de los elementos de proceso

b. Características geotécnicas	Altura, profundidad y carga de los elementos de proceso
c. Nivel freático	Profundidad de los elementos de proceso
3. Inundabilidad del terreno (condicionante local)	Superficie y disposición de los elementos de proceso
4. Disponibilidad de materiales y mano de obra especializada (condicionante local)	Necesidades de materiales y complejidad de construcción

C. Sostenibilidad técnica

La sostenibilidad técnica evaluaría la capacidad de la instalación para cumplir con su cometido y, por tanto, estará condicionada por la capacidad del prestador para realizar el mantenimiento físico, funcional y operativo de la infraestructura construida.

Aspecto analizado	Característica de la alternativa
1. Capacidad técnica y recursos del prestador (condicionante local)	Complejidad de operación y mantenimiento de las instalaciones
2. Disponibilidad de repuestos y de servicio técnico en la zona (condicionante local)	Sofisticación y complejidad de los equipos y procesos
3. Disponibilidad de energía eléctrica (condicionante local)	Necesidades energéticas de las instalaciones
4. Riesgo de no cubrir vacantes adecuadamente por falta de profesionales capacitados (riesgos)	Complejidad de operación y mantenimiento de las instalaciones
5. Riesgo de cambio político-institucional (riesgos)	Complejidad de operación y mantenimiento de las instalaciones

D. Sostenibilidad económica

La sostenibilidad económica evaluaría la capacidad económica del prestador para prestar de modo continuado el servicio.

Dependiendo de si la financiación de las obras, en su totalidad o en parte, es asumida por una entidad externa a la población, la sostenibilidad económica del servicio podrá evaluarse de formas distintas. Así, se pueden diferenciar dos casos extremos:

- **Financiación externa de las obras.** Cuando la financiación de las obras se asume por un promotor externo a la población y al prestador, como una donación, los costos de construcción no formarían parte de la sostenibilidad económica y sería más conveniente evaluarlos independientemente de los costos de operación y mantenimiento. Los costos de construcción podrían ser un factor poco importante si así lo determina el promotor de las obras. Incluso, en algunos casos se puede preferir asumir un mayor costo en la construcción si con ello se logran reducir los costos de operación y mantenimiento, que son los únicos que condicionarán en el futuro la sostenibilidad.
- **Financiación con recursos propios.** Cuando la financiación de las obras es asumida por el prestador o por la población beneficiaria, ambas variables deben integrarse en un costo total anualizado, siendo este el que condiciona la sostenibilidad económica.

Entre estas dos situaciones se podrán encontrar todo tipo de casos intermedios, donde una fuente de financiación externa aporta parte de los recursos y el resto debe ser asumido por la población o el prestador. El estudio del factor económico deberá organizarse en función de los agentes que intervengan y de cómo repercuta en el costo final que han de asumir el prestador y los usuarios.

La disponibilidad de recursos económicos para la sostenibilidad económica va a venir determinada por la disponibilidad al pago de los usuarios y las subvenciones que puedan existir procedentes de fuentes externas. La disponibilidad al pago estará muy relacionada con la sostenibilidad social.

Por otra parte, se debe llamar la atención sobre los costos de reposición, que generalmente se olvidan. Si se quiere asegurar la sostenibilidad económica en el futuro, aunque la financiación inicial de las obras se aporte con recursos externos, cuando los elementos de las instalaciones vayan llegando al final de su vida útil, el prestador debería estar en condiciones de poder reponerlos, por lo que debería haber generado unos recursos que, al menos, sostuvieran su capacidad de financiación.

A continuación se identifican una serie de aspectos específicos que deberían analizarse para los costos de construcción y los costos de operación y mantenimiento.

D.1. Costos de construcción

Aspecto analizado	Característica de la alternativa
1. Presupuesto disponible (condicionante del proyecto), teniendo en cuenta que deben incluirse otros costos, además de la PTAR, como son: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Instalaciones complementarias a la PTAR (camino de acceso, enganche a la red eléctrica, emisario a la planta y del vertido) ▪ Terreno ▪ Servidumbres de paso 	Costos de construcción.
2. Precios unitarios de partidas de obra y de equipos electromecánicos más importantes.	Determinación de las partidas presupuestarias necesarias: Obra civil y equipos electromecánicos de las instalaciones de tratamiento, instalaciones auxiliares, edificios, urbanización y cerramiento
3. Necesidades de financiación y costos asociados	
4. Riesgo financiero, tipos de interés (riesgos)	
5. Riesgos de apreciación/depreciación de divisas durante la preinversión (riesgos)	Necesidades de equipos singulares que puedan ser objeto de importación
6. Riesgos de variación de costos asociados a la construcción (riesgos)	Requerimientos de equipos o materiales constructivos especialmente sensibles a variaciones de precios en los mercados internacionales, como el acero

D.2. Costos de operación y mantenimiento

Aspecto analizado	Característica de la alternativa
1. Disponibilidad de recursos económicos para la operación y mantenimiento, que dependerá de la disponibilidad al pago, de la economía de escala (costos repartidos entre más usuarios) y de los aportes de financiación externos en subvenciones o especies (condicionante del prestador).	Costo de la operación y mantenimiento de la instalación, estimado a partir de las partidas más importantes, entre las que se pueden destacar por su importancia las siguientes
2. Disponibilidad del personal necesario y sueldos	Dedicación para labores de operación y mantenimiento y especialización requerida
3. Precio de la electricidad en la actualidad y previsión a futuro	Consumo energético
4. Precio de transporte y de disposición de lodos y previsión a futuro	Cantidad y calidad de lodos generados y su frecuencia de descarga
5. Costo de reparaciones y reposiciones de equipos y elementos singulares	Equipos y elementos singulares
6. Costos de reposición	Costos de renovación y vida útil de los distintos elementos
7. Riesgos de variación de costos, especialmente la energía y transporte de lodos (riesgos)	Necesidades energéticas de las instalaciones

E. Sostenibilidad social

La sostenibilidad social dependerá del grado de concientización y compromiso de los usuarios con el proyecto y se verá afectado por todo aquello que pueda posicionar a la población a favor o en contra de la instalación.

Aspecto analizado	Característica de la alternativa
1. Riesgo de impacto en viviendas y actividades cercanas (condicionante local)	Molestias generadas por las instalaciones
a. Riesgo de afección por olores	Generación potencial de Olores
b. Riesgo de afección por ruidos	Generación potencial de Ruidos
c. Impacto paisajístico	Altura de la instalación y grado de integración paisajística
2. Experiencias (propias o por repercusión mediática) de la población y de los operadores frente a determinadas tecnologías (condicionantes locales)	Encaje de las instalaciones frente a los prejuicios existentes

F. Sostenibilidad ambiental

La sostenibilidad ambiental evaluaría si se tienen en cuenta las necesidades de las generaciones futuras y del medio ambiente en general.

Aspecto analizado	Característica de la alternativa
1. Minimización de la emisión de GEI (objetivo)	Emisiones potenciales de GEI de las instalaciones
2. Minimización del consumo energético de fuentes no renovables (objetivo)	Consumo energético de las instalaciones. Potencialidad de recuperación de energía a partir de biogás.
3. Mejora de la eficiencia hídrica (objetivo)	Potencialidad de la tecnología para el reúso de agua
4. Valorización de los lodos (objetivo)	Características de los lodos producidos en las instalaciones
5. Requerimientos de recuperación de residuos (objetivo)	Potencialidad de recuperación de la tecnología

En esta relación de criterios no se ha incluido el ámbito de la sostenibilidad institucional porque los aspectos que contempla, más que influir de forma directa en la selección de alternativas, introducen riesgos e incertidumbres en otros factores y resulta más claro para el análisis, considerar esos riesgos dentro de cada factor.

Es importante tener en cuenta que, aunque se pueda tomar de referencia, la relación de aspectos incluida aquí no es exhaustiva y, en cada caso concreto, tras realizar el análisis correspondiente, probablemente surjan cuestiones adicionales. Para ilustrar la casuística que se puede presentar y a modo de ejemplo, se exponen a continuación dos situaciones donde convendría analizar cuestiones adicionales:

- En el caso en que se vaya a realizar la renovación de instalaciones será muy importante evaluar también la compatibilidad de las tecnologías propuestas con las instalaciones existentes.
- Si hay casos singulares en los que existe alguna actividad cercana a la PTAR con la que se pueden producir sinergias positivas o negativas, se debería tomar en cuenta.

Tras el análisis en detalle de todos los aspectos, se identificarán los criterios que es necesario considerar en la valoración de las alternativas y se identificarán los atributos de las alternativas por los que se podrán valorar. En el capítulo 6 se podrá ver un análisis detallado de los criterios que más comúnmente se utilizan en el análisis de alternativas de tratamiento.

5.6 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS A VALORAR

Para tratar de llegar a un número de alternativas razonable y centrar los estudios solo en aquellas que realmente tengan posibilidades de ser elegidas, el proceso de decisión requiere de una etapa previa, donde se descarten las alternativas inviables o que claramente no van a tener posibilidades de ser elegidas, a partir de los criterios identificados en el apartado anterior.

La identificación de estos factores y el descarte de tecnologías resultará una operación relativamente rápida e intuitiva si se tiene un conocimiento amplio sobre las diferentes tecnologías. Sin embargo, si el conocimiento es limitado, es frecuente que se cometan errores incluyendo alternativas en el estudio que podrían haberse descartado o, lo que es peor, descartando alternativas viables.

Aplicación de factores limitantes

Como se ha visto en el apartado anterior, los criterios limitantes pueden ser muy variados y en esta fase del estudio no se cuenta con un prediseño de las alternativas, por lo que es habitual acudir a tablas

comparativas de la bibliografía especializada, donde se establecen umbrales orientativos de referencia para los factores y las tecnologías o líneas de tratamiento. A continuación, se exponen algunos ejemplos sobre cómo se podrían descartar alternativas en función de aquellos.

- Si uno de los requisitos de calidad del efluente tratado fuera, por ejemplo, un alto grado de reducción del amonio presente (se requiere la nitrificación), se descartarían todas las líneas de tratamiento que no fuesen capaces de conseguirlo, como sería el caso de las lagunas de estabilización en su configuración tradicional o los tratamientos anaerobios, si no van complementados posteriormente por tratamientos que permitan nitrificar.
- En el caso de que la temperatura media del agua del mes más frío fuese menor a 15-16°C se deberían descartar los tratamientos anaerobios en línea de agua, como el RAFA o FAFA, ya que por a partir de esta temperatura su rendimiento decae.
- Cuando la disponibilidad de terreno es reducida determina el descarte de muchas de las líneas basadas en tecnologías extensivas, como sería el caso de las lagunas de estabilización o humedales, que tienen requerimientos de superficie sustancialmente mayores que las intensivas.
- Si en una gran instalación se impone la obligación de alcanzar la neutralidad energética, se deberán contemplar líneas que permitan la generación de biogás y su aprovechamiento, tendiendo a descartar opciones que basen todo el tratamiento de agua y lodos en el consumo energético, como la de la aireación extendida.

Otros factores de gran peso

Además de los factores que resultan claramente limitantes, hay otros que dependiendo de las situaciones locales deberían tener un peso muy importante en la selección de tecnologías porque suponen el riesgo más elevado para la futura sostenibilidad del servicio.

- El caso más típico en las pequeñas poblaciones sería el gran peso que deben tener los factores relacionados con la sostenibilidad técnica y económica, puesto que el prestador va a tener capacidades muy limitadas. En estos casos y salvo que coincidiera con otros factores que pudieran suponer un peso mayor, las tecnologías complejas y costosas de mantenimiento y operación podrían descartarse del análisis, porque de manera evidente, después del estudio, saldrían mucho peor valoradas.
- Los problemas derivados de las características del terreno, en general, se podrían solventar con incrementos de los costos de construcción, que serán diferentes para las distintas tipologías de tratamiento. Sin embargo, en los casos donde estas problemáticas resulten muy evidentes no sería necesario siquiera llegar a ese análisis, al complicarse en exceso las soluciones constructivas. Por ejemplo, si el terreno disponible fuera rocoso y de elevada pendiente, no tendría sentido siquiera plantear la alternativa de un lagunaje (ver figura 11). Nuevamente estas características pueden tener tanta influencia en la selección de la tecnología que su consideración debería haber condicionado la selección de terrenos.



Figura 11 Reconocimiento de los terrenos disponibles para la implantación de una PTAR, Santo Tomás, Nicaragua

- Otro ejemplo de factores con un peso extremo podría ser cuando los terrenos de la PTAR se encuentren colindantes a asentamientos de población o actividades muy sensibles (hospitales, escuelas, centros turísticos, por ejemplo). En este caso las tecnologías muy susceptibles de producir fuertes olores, como podrían ser las lagunas anaerobias sin cubrir, deberían descartarse o prever un cubrimiento de las mismas.

El problema de la limitación por olores y otras molestias se va a encontrar muy frecuentemente en los proyectos de rehabilitación de una PTAR, cuando esta ha llegado al final de su vida útil. Las instalaciones que en su momento se construyeron a las afueras de la población, una vez transcurridos 30 años, en muchos casos se han visto absorbidas por el crecimiento poblacional, convirtiéndose en un problema social importante. Si al remodelarlas no es posible cambiar su ubicación, la presión social en estos casos suele ser de tal nivel que el impacto sobre los vecinos se convierte en el principal factor limitante de las tecnologías.

Aunque la criba generalmente se realice en base a las limitaciones de procesos concretos o tecnologías, es importante recordar que el resultado de esta fase de descarte debe ser una batería de líneas de tratamiento viables. De hecho, algunos de los factores limitantes podrían llegar a superarse, al menos en parte, introduciendo nuevos elementos y procesos en las instalaciones. Así, podrían lograrse rendimientos más exigentes añadiendo etapas de procesos a la línea, la resistencia a las variaciones bruscas puede mejorarse con un tanque de laminación o los problemas de olores podrían controlarse cubriendo y desodorizando las instalaciones.

Pueden darse situaciones especialmente complejas donde confluyan diferentes criterios limitantes y que, además, orienten la selección en sentidos contrarios. Por ejemplo, si una pequeña población, con un prestador de capacidades limitadas, dispone solo de un terreno con superficie limitada y muy cercana a las actividades turísticas (Ver figura 12). En este caso no se podrían descartar las soluciones intensivas y aerobias (consumidoras de energía), ya que serían las que podrían superar los condicionantes de la ubicación. Probablemente en este tipo de casos, para poder alcanzar una solución

sostenible, será necesario introducir elementos que reduzcan los costos (energía fotovoltaica) y/o desarrollar los ejes del prestador y de la demanda de los usuarios (incluyendo por ejemplo a los promotores turísticos en el sistema y, con ello, en la financiación de la operación y mantenimiento de las instalaciones).



Figura 12 PTAR de San Marcos La Laguna, Sololá, Guatemala (Fotografía de AMSCLAE)

Evitar el sesgo en la selección

Finalmente, en este apartado conviene incluir una advertencia de carácter general sobre los procesos de identificación y de selección previa de alternativas. En ocasiones, el proyectista puede tener cierta tendencia, consciente o inconsciente, a incluir en la selección previa de tecnologías solo aquellas que más conoce, evitando otras que, aunque puedan ser adecuadas, carece de experiencia sobre su diseño. Incluso, en los casos donde el mismo contrato cubre el estudio de alternativas y la redacción del proyecto constructivo, este sesgo puede ser más importante, puesto que el consultor puede tender a orientar la selección definitiva hacia los procesos sobre los que tenga más experiencia.

Por estos motivos se debe asegurar que el primer listado de tecnologías considerado, antes de la selección, sea exhaustivo y el proceso esté supervisado. Asimismo, sería conveniente contratar los estudios previos y la selección de alternativas separadamente de la redacción final del proyecto constructivo; aunque esto no suele ser posible dentro de los plazos del ciclo de proyecto.

En todo caso es fundamental que el descarte de alternativas, además de realizarse de un modo adecuado, quede debidamente justificado en el proyecto.

5.7 PONDERACIÓN DE CRITERIOS

Como ya se ha dicho, la agrupación de factores debería realizarse en cada caso concreto buscando resultar lo más operativa posible dentro del estudio de toma de decisiones. De esta manera, su objetivo principal sería distinguir los diferentes grandes ámbitos o aspectos en los que debería basarse la decisión y, por tanto, deberá adaptarse a las circunstancias locales y a la importancia que se quiera evidenciar de los diferentes factores sobre la decisión final.

En la metodología propuesta, después de haber identificado los criterios de selección generales, será necesario evaluar la importancia de estos. Con este objetivo a cada ámbito o criterio general se le asignará un peso, dependiendo de la importancia relativa que deba tener sobre la decisión en

comparación con los demás. La importancia que cada criterio pueda alcanzar en cada caso concreto va a depender en gran medida, al igual que para la selección de criterios, del contexto existente, de los objetivos y de los riesgos del proyecto.

5.7.1 Participación de los agentes interesados

Como se aclaró en el capítulo 4, los pesos no son algo intrínseco del problema, sino que reflejan la importancia que cada observador otorga a los diferentes aspectos del problema a resolver. La construcción y el mantenimiento en servicio de una instalación de tratamiento de aguas residuales presenta muchas facetas diferentes, algunas de las cuales pueden estar claramente en conflicto, y las diferentes alternativas estudiadas presentarán más ventajas en unos aspectos que en otros.

Los distintos agentes interesados en la construcción de una planta de tratamiento (consultor, promotores, usuarios, prestador, vecinos próximos a la instalación, administraciones, autoridades medioambientales, etc.) tendrán perspectivas diferentes del problema y muy probablemente ninguno de ellos realizaría el mismo reparto de pesos que otro. En el box siguiente se ha querido ilustrar con un ejemplo hipotético estas diferencias que se pueden encontrar en casos reales.

Box 3. Ejemplo de asignación de pesos por diferentes actores

En las tablas y figuras siguientes se muestra un ejercicio hipotético de ponderación para intentar ilustrar la situación que se podría encontrar cuando participan diferentes actores en un estudio de alternativas. Cada uno de ellos percibe el problema desde su perspectiva particular y considera que la solución ideal será aquella que mejor cumple con los factores que él considera importantes. Probablemente, para los vecinos de la planta de tratamiento el criterio más importante y con mucha diferencia sobre los demás será el de las posibles molestias que les puedan generar las instalaciones. Sin embargo, el operador de la planta y la globalidad de la población darán prioridad al costo económico. Para el promotor del proyecto el costo de construcción será tan importante o más que el resto de los factores. En consecuencia, lo más probable es que ninguno de los intervinientes o afectados por la decisión tenga exactamente el mismo parecer que otro en lo que respecta al peso de cada criterio.

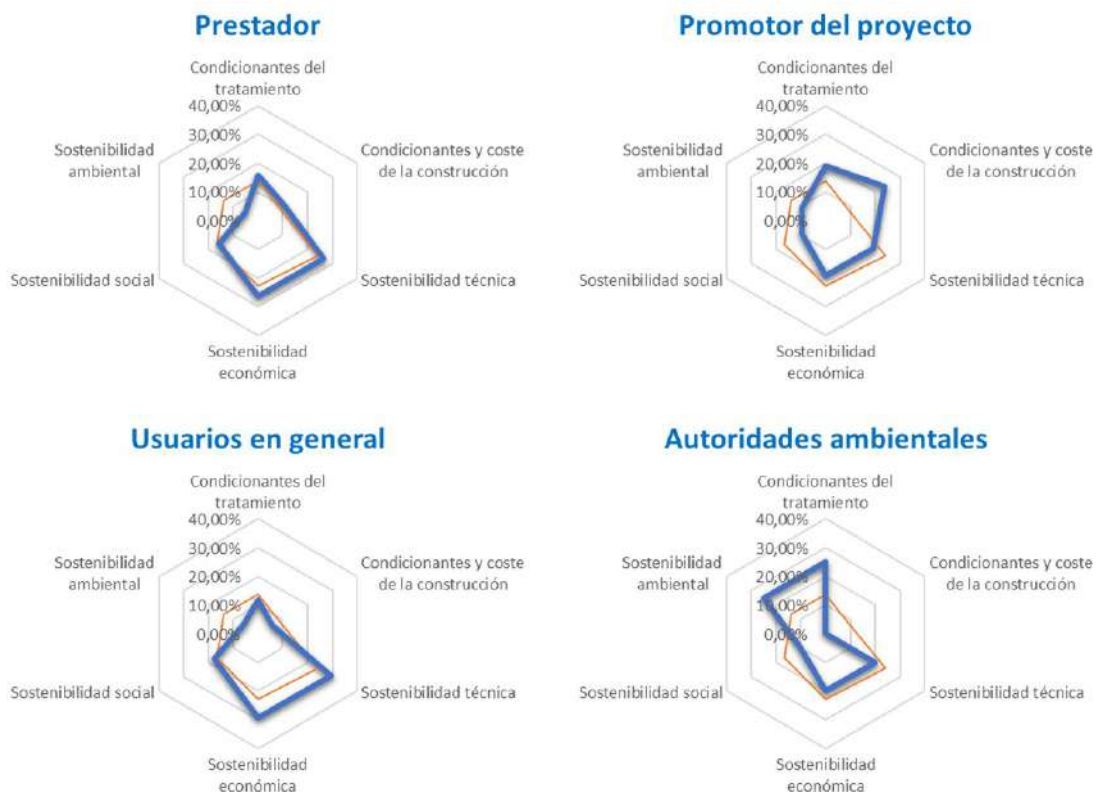
En la primera tabla se habría solicitado a cada actor que reflejara la importancia que a su juicio tendría cada criterio, puntuando en una escala de 1 a 5.

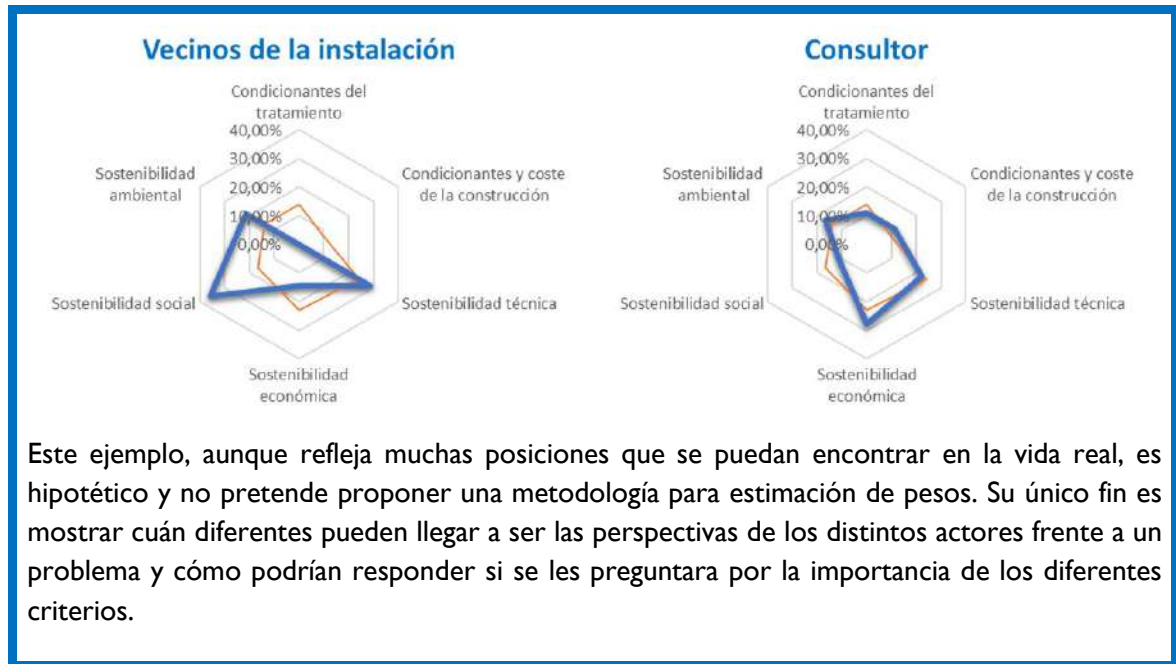
	Prestador	Usuarios en general	Vecinos de la instalación	Promotor del proyecto	Autoridades ambientales	Consultor	Promedio
Condicionantes del tratamiento	4	3	0	4	5	2	3,0
Condicionantes y costo de la construcción	2	1	0	5	0	2	1,7
Sostenibilidad técnica	5	5	4	4	4	4	4,3
Sostenibilidad económica	5	5	2	4	4	5	4,2
Sostenibilidad social	3	3	5	2	2	2	2,8
Sostenibilidad ambiental	1	1	3	2	5	3	2,5

A partir de esta tabla se podría obtener la importancia relativa dada por cada agente a cada criterio sobre la decisión final, que se reflejaría en la siguiente tabla.

	Prestador	Usuarios en general	Vecinos de la instalación	Promotor del proyecto	Autoridades ambientales	Consultor	Promedio
Condicionantes del tratamiento	20%	17%	0%	19%	25%	11%	16%
Condicionantes y costo de la construcción	10%	6%	0%	24%	0%	11%	9%
Sostenibilidad técnica	25%	28%	29%	19%	20%	22%	23%
Sostenibilidad económica	25%	28%	14%	19%	20%	28%	23%
Sostenibilidad social	15%	17%	36%	10%	10%	11%	15%
Sostenibilidad ambiental	5%	6%	21%	10%	25%	17%	14%

Si se representan gráficamente estos resultados se puede apreciar de una manera muy clara las importantes diferencias que puede haber entre los distintos interesados. En las figuras siguientes se ha incluido también el valor promedio, pero debe quedar claro que no tiene más fin que disponer de una referencia para la comparación. En absoluto se pretende que se adopte este valor medio como propuesta final de ponderación.





En resumen, en el ejercicio de ponderación no se debería buscar el “peso verdadero”, sino el consenso entre las diferentes agentes que intervienen. La aportación de un consultor experimentado será muy importante para organizar y guiar este ejercicio, pero su opinión no debería ser la única, porque podría estar sesgada.

El papel del técnico responsable

De todos los interlocutores del ejemplo anterior, el consultor contratado para hacer los estudios sería el más ajeno al problema puesto que, una vez finalizado los trabajos, se desvincula del proyecto y no sufre las consecuencias. Como responsable de realizar la selección de alternativas y como técnico experimentado en la materia, debería ser consciente de esta situación y tratar de compensar opiniones explicando a todos los intervinientes las razones para considerar en mayor o menor grado determinados aspectos. Para ello debería esforzarse en realizar un planteamiento de análisis de las ponderaciones lo más coherente posible, enfocado a tratar de alcanzar el mayor grado de sostenibilidad posible del servicio.

Como se ha dicho, la decisión sobre los pesos finales será el resultado de un debate entre las diferentes posiciones. Dependiendo de los agentes que participen en este diálogo y de su capacidad para defender sus posiciones, un mismo problema podría resultar en diferentes pesos, así unas veces podrá estar más orientada a la posición de la administración promotora o hacia el prestador o hacia la población. Es importante que el consultor encargado de los estudios sea consciente de todo esto y trate de evitar posicionamientos extremos y compensar a los interlocutores que no estén presentes o que tengan menor capacidad de debate. Por ejemplo, las autoridades ambientales no van a estar presentes en el ejercicio, aunque sí podrán estar luego en la revisión si actúan en algún procedimiento de evaluación de impacto ambiental. Por tanto, el consultor ha de sostener la importancia de la sostenibilidad ambiental en general, frente al resto de interlocutores para que esta cuestión no se desestime.

Para todo ello, resulta muy conveniente que este ejercicio se realice mediante un proceso razonado, debatido e iterativo. Todos los interesados que participen en el proceso deberían ser conscientes que su opinión viene determinada su propia perspectiva y responde a los fines principales que en su

entender debe tener la solución final, pero que existen otras perspectivas e intereses diferentes a los suyos con las que deben conjugarse. A todos ellos se les debería advertir que la ponderación adoptada finalmente no va a coincidir exactamente con la que ellos hubieran preferido.

Sería importante tratar de llegar al consenso, al menos, en cuanto al orden de importancia que deben seguir los criterios y asegurarse de que las decisiones queden debidamente explicadas para que puedan ser entendidas por todos, aunque no se compartan. En caso contrario, una vez seleccionada la alternativa, alguno de los agentes disconformes podría tratar de anular la decisión desprestigiando el método.

En cualquier caso, la realización de un análisis de sensibilidad al final del estudio, como se verá más adelante, puede ser muy útil para mostrar las repercusiones reales de adoptar otros supuestos de ponderación y, probablemente, en un porcentaje elevado de casos no variará la selección de la alternativa óptima.

5.7.2 Incertidumbre en la ponderación

Dado que la importancia que tengan los diferentes criterios en cada caso va a depender de las circunstancias locales, el acierto con que se pueda llevar cabo esta ponderación requiere también del conocimiento de la situación obtenida a partir de los estudios previos realizados.

Además de la disparidad de pareceres que pueden tener los distintos interesados, se ha visto también frecuentemente que, si un mismo agente o experto analiza el mismo problema pasado un tiempo, puede llegar a ponderarlo de forma ligeramente diferente. Esto demostraría la gran dificultad del ejercicio de ponderación, donde se manejan muchas cuestiones, y la conveniencia de contar con un sistema metódico de apoyo.

La dificultad que a veces se percibe al tratar de establecer los pesos se debe también a que realmente no se cumplen del todo las premisas asumidas para construir el modelo de decisión. Revisando las premisas identificadas en el capítulo 4:

- Independencia entre criterios valorados.
 - No debe haber interdependencia. No es del todo cierto entre las diferentes facetas de la sostenibilidad. Si falla algún aspecto, otros se podrán ver afectados también.
 - No debe haber solapamiento entre los criterios valorados, para evitar un doble conteo. Tampoco se cumple del todo, puesto que hay factores que inciden en más de una faceta.
- El valor general de cada alternativa es la suma de los factores. Se está planteando como valoración general una medida de tendencia central (media ponderada). Por tanto, si los valores de los resultados están agrupados en torno al valor de la media sí puede ser representativa del resultado, pero si divergen de manera importante, una media o una suma simple no aportará información útil de valoración, sino que la ocultará. Cuanto más contradictorios sean los criterios de una elección entre sí, más alejado se estará de esta premisa. Incluso carecerá de sentido obtener un índice de valoración general único.
- Un mal resultado en un criterio se puede compensar con un mejor resultado en alguno de los otros criterios. Puede que se pueda asumir cierta compensación entre criterios, siempre que las puntuaciones se mantengan en variaciones pequeñas, pero los casos extremos realmente no se compensan y un caso extremo por sí mismo podría condicionar toda la decisión.
- El peso que un criterio debe tener en la decisión va a ser el mismo, independientemente del valor de los atributos evaluados y de las diferencias con otras tecnologías. Esta es quizás la

premisa cuyo incumplimiento introduce más incertidumbre en la conceptualización del peso como algo fijo, que mide la incidencia que un criterio debe tener en la decisión independientemente de los resultados. Situaciones extremas de un valor o de las diferencias entre alternativas pueden condicionar completamente la decisión, independientemente del peso que tendría ese criterio si todas las alternativas se encontraran en valores próximos.

El propio proceso de selección previa de alternativas propuesto en estas recomendaciones evidencia que realmente la importancia de un factor en la decisión no es algo fijo, sino que existen factores que por sí mismos, en determinados rangos y para determinadas alternativas pueden ser completamente limitantes.

Con todo esto se evidencia que un proceso de decisión no es algo tan sencillo como una suma ponderada de factores, aunque ese haya sido el modelo de análisis propuesto. Si fuera así, probablemente no sería tan complicado llegar a la decisión de una forma intuitiva. Asimismo, se reafirma el mensaje de que estas herramientas aportan una ayuda en la decisión, pero no son sistemas predictivos.

A pesar de todas las dificultades intrínsecas del método, se defiende esta metodología por su sencillez y porque puede ser explicada y entendida de forma fácil por todos los interesados. Otros modelos y algoritmos de decisión más complejos, que representaran más fielmente la complejidad del sistema de toma de decisiones introduciendo, por ejemplo, una ponderación variable en función de los resultados de la puntuación o de las diferencias encontradas entre las alternativas, resultarían mucho más difícil de entender e introduciría nuevos campos de subjetividad, por lo que probablemente no merezca la pena su desarrollo. Lo que sí puede realizarse, una vez obtenidos los resultados parciales, es comprobar si en algunos criterios existen situaciones extremas para algunas alternativas o diferencias muy significativas entre unas y otras, lo que pudiera aconsejar dar un mayor peso a ese criterio en la decisión final. Estos planteamientos, en cualquier caso, deberían estar consensuados.

5.7.3 Métodos de apoyo en la ponderación

En el capítulo 4 ya se mencionaron algunos métodos de apoyo para la realización de la ponderación. En esta propuesta metodológica, dado que la dependencia de las circunstancias locales puede ser muy importante, el sistema de ponderación es potestativo del equipo evaluador, aunque siempre deberá quedar debidamente explicado para que todas las entidades que intervienen en el proyecto puedan conocer su justificación.

Un método de los más empleados es el de tasación simple, consistente en que el decisor da una valoración de cada peso en una cierta escala (de 0 a 5, de 0 a 10, etc.). Una vez obtenidas las valoraciones, estas se normalizan dividiendo cada valor por la suma de todos ellos (ver método empleado en el box 3). La tabla siguiente reflejaría un ejemplo de ponderación en cuatro niveles.

Tabla 2. Ejemplo de propuesta de niveles de ponderación

Nivel	Coficiente multiplicador
Muy importante	4
Importante	3
Importancia media	2
Poca importancia	1

Este sistema de ponderación resulta bastante sencillo de aplicar y se encuentra muy difundido. Sin embargo, presenta problemas importantes de interpretación y no se adapta muy bien a la realidad de

lo que es un proceso de decisión multicriterio donde el valor de los criterios se agrega por media ponderada. En un modelo aditivo, como el seleccionado en esta metodología, lo que la ponderación estaría determinando sería el peso de cada factor en la decisión final. Si se pondera por tasación simple se están asumiendo algunas premisas que seguramente no serán correctas en el caso de la selección de alternativas de tratamiento, como son:

- Todos los criterios importantes son igual de importantes de cara a la decisión final.
- La influencia de cada factor en la decisión vendrá determinada, además de por su peso, por el número total de factores considerado y, en consecuencia, cuantos más factores se consideren, menor influencia va a tener cada uno de ellos en la decisión.

Un sistema de ponderación de este tipo, por tanto, estará muy condicionado por la forma en que se agrupen los diferentes factores. Si los diferentes criterios se han agregado en unos pocos ámbitos o se han mantenido más desagregados, la importancia relativa de cada uno variará. Además, resulta claramente incorrecto estimar que todos los criterios importantes deban tener la misma importancia en la decisión final, pudiendo haber uno o dos de ellos que deberían destacar sobre los demás. Por ejemplo, en un caso concreto puede estar muy claro que el principal riesgo para la sostenibilidad del servicio sea la sostenibilidad económica, por lo que podría decidirse que el peso de la decisión recayera en ese criterio de una forma importante (25-30%) independientemente del número de factores que se considera y de si puede haber otros factores importantes.

Otros procedimientos de ponderación parten de la perspectiva contraria: Se establece un peso para cada criterio, como un porcentaje del total, de tal forma que la suma complete el 100% de la decisión.

Probablemente, la mejor forma de establecer los pesos será mediante un proceso iterativo, por comparaciones sucesivas horizontales y verticales, hasta que se llegue a una ponderación que resulte la más aceptable para el equipo que interviene en el análisis. Primeramente, se vuelve a destacar la importancia de realizar una agrupación adecuada de criterios por ámbitos llegando al menor número posible. Posteriormente se puede partir de una valoración individual de cada uno de los ámbitos en el contexto del problema, clasificándolo en categorías, posteriormente se compararían los ámbitos entre sí, ordenándolos por el orden de importancia que deberían tener sobre la decisión y partir de ahí se revisarían los pesos ajustándolos a los porcentajes definitivos de incidencia.

En el capítulo 6 se analizan para la mayor parte de los criterios una serie de situaciones donde pueden resultar más o menos importantes para el estudio. Aunque la ponderación de cada uno de ellos sobre la decisión final dependerá no solo de su situación particular, sino también de la comparación con los demás factores.

5.8 SISTEMAS DE PUNTUACIÓN DE CADA CRITERIO

Tras la ponderación de los criterios generales es necesario establecer un procedimiento para poder evaluar cada uno de los ámbitos. Cada uno de los factores se podrá valorar a partir de algún atributo de las alternativas y deberá establecerse un procedimiento para integrar la información de todos los factores dentro de un ámbito. Por tanto, este proceso requiere de diferentes tareas:

- Identificar y medir el atributo de las alternativas que se van a valorar
- Establecer un procedimiento que traduzca el valor medido del atributo en una representación de su efecto sobre la solución en la parte del problema que se acota con ese subcriterio
- Agregar la información de cada subcriterio para puntuar cada ámbito o criterio general.

Esta diferenciación en tres pasos no siempre resulta tan clara puesto que pueden existir otras vías de integrar la información, como la realización de un prediseño o la traducción de los efectos en costos de construcción y operación (ver anexo II).

Respecto a los atributos a valorar, se recuerda que en el apartado 4.3.4.I se incluyeron una serie de características deseables que se debería tratar de tomar en consideración.

5.8.1 Sistemas de puntuación de los atributos

Algunos de los atributos que se emplean para valorar los factores serán cuantificables, como los costos, la superficie ocupada o la producción de lodos. En otros casos no se podrá obtener un valor numérico o su obtención requeriría de estudios sofisticados que no todos los proyectos se pueden permitir, como las posibles molestias generadas por los olores o los ruidos. En el anexo II y en capítulo 6 se profundiza en el detalle de los factores y los atributos a valorar, si bien se introducen aquí una serie de cuestiones generales.

La valoración de cada atributo requerirá asignar a cada nivel de su medida, un valor dentro una escala arbitraria definida para ello (por ejemplo, de 1 a 5 o de 1 a 10) que traduce ese nivel en su efecto sobre el problema. Hay muchos tipos de atributo y los métodos de puntuación pueden ser muy diversos, si bien, una primera distinción se podría establecer entre los atributos que pueden ser medidos cuantitativamente y los que no.

Atributos medidos de forma cuantitativa

En los casos donde se pueda contar con un atributo que pueda ser medido de forma cuantitativa, la evaluación no requiere realizar una estimación cualitativa de dicha medida y, por tanto, la subjetividad se reduce. Es por ello por lo que, en el caso de que todos los datos asociados se hayan obtenido a partir de prediseños y con una metodología y alcance similar para todas las líneas, al estar basados en datos objetivos, no será necesaria una justificación de la medida del atributo.

Pero incluso en el caso de que el atributo valorado sea una medida numérica continua, puede convenir realizar una valoración en valores discretos (por categorías), debido a que no tiene por qué existir una relación directa entre la medida del atributo y su valoración y tratar de encontrar un algoritmo que represente adecuadamente esta relación puede requerir mucha dedicación; algo innecesario si se compara con la importancia de cada parámetro en la decisión final y con la pérdida de precisión que puede suponer en la incertidumbre global del modelo de decisión.

La valoración de las medidas de los atributos puede realizarse de forma directa, por ejemplo, diferenciando categorías de calidad por rangos de valores del atributo, o de forma relativa, comparando las medidas del atributo obtenidas en todas las alternativas y asignando categorías de valoración basadas en esa diferencia. Por ejemplo, se pueden clasificar los valores de las medidas en función de los porcentajes de incremento, o disminución, sobre el valor medio de todas las alternativas. La siguiente tabla muestra un ejemplo de porcentajes se podrían utilizar para una escala de uno a cinco definida para el caso del criterio costos de operación y mantenimiento.

Tabla 3. Ejemplo de establecimiento de niveles de valoración para atributos cuantificables aplicado al criterio de costos de operación y mantenimiento.

Costo con respecto al costo promedio	Valoración
Mayor de un 120% del costo promedio	1
Entre un 105% y un 120% del costo promedio	2
Entre un 95% y un 105% del costo promedio	3
Entre un 80% y un 95% del costo promedio	4
Menor de un 80% del costo promedio	5

Atributos medidos de forma cualitativa

Los criterios no cuantificables serán aquellos que por su naturaleza o por la ausencia de información específica, no será posible contar con atributos que permitan obtener una medida numérica. En estos casos, no solo la valoración del criterio tendrá una componente subjetiva sino también lo tendrá la propia medida del atributo, por lo que conviene, siempre que sea posible, apoyar la medida en atributos cuantificables. Si no es posible, sería muy deseable que las calificaciones del atributo estén sustentadas por lo establecido en alguna guía de referencia.

En esta situación se encontrarían, por ejemplo, los criterios como riesgo de emisión de ruidos, riesgo de generación de olores o impacto visual. La figura 13 muestra un ejemplo de dichas valoraciones tipo, concretamente extraída del Manual para la Implantación de Sistemas de Depuración en Pequeñas Poblaciones (MARM, 2010).

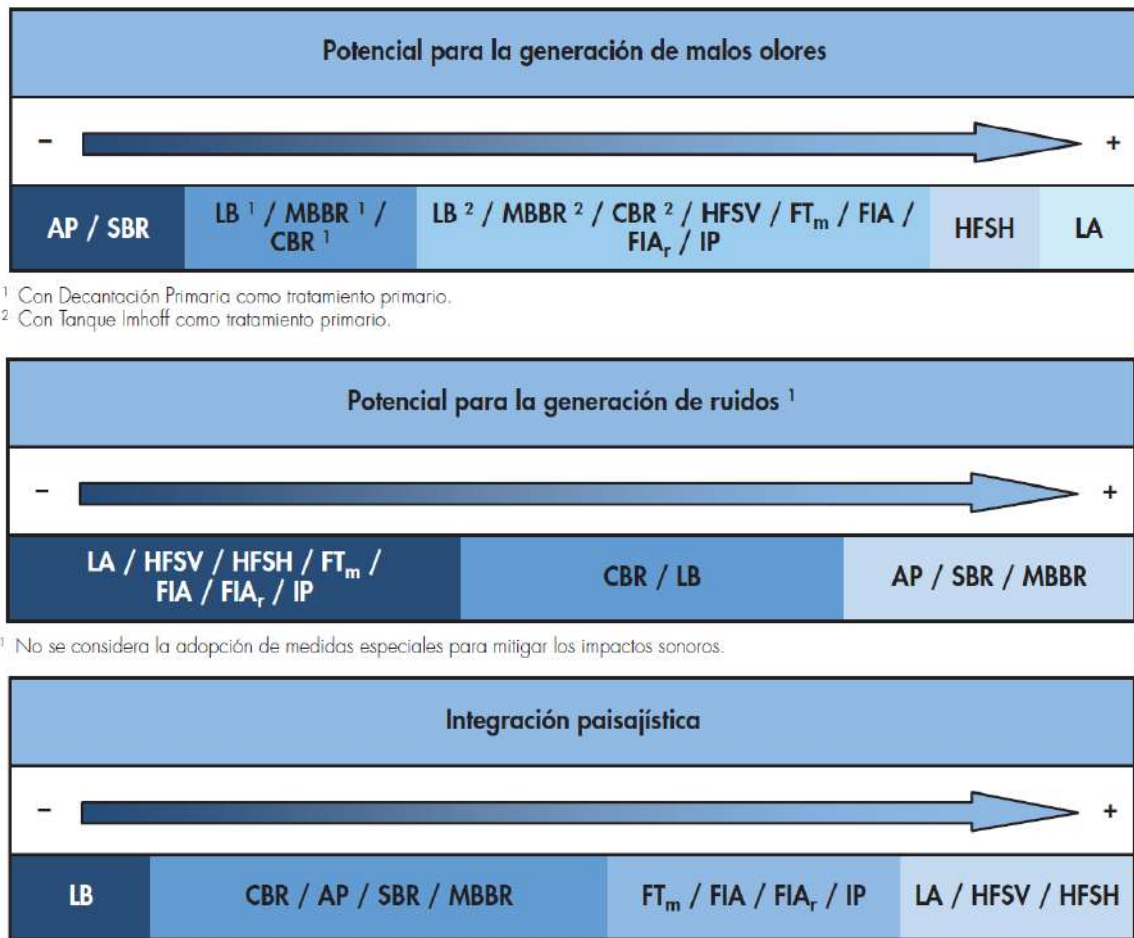


Figura 13 Clasificación del potencial para generar impactos en la población de las tecnologías (MARM, 2010)

A partir de la categoría en la que se califica el atributo de cada alternativa, se podrá obtener su valoración para cada factor en la escala definida. Normalmente esta traducción se realiza de una manera muy sencilla, asignado simplemente un valor de la escala de valoración a cada una de las categorías del atributo.

En el capítulo 6 se muestran, para muchos de los factores considerados, ejemplos de este tipo de clasificaciones de los atributos de las líneas de tratamiento. Asimismo, el caso práctico expuesto en el anexo III, se puede tomar también como referencia para llevar a cabo la valoración de algunos criterios.

5.8.2 Evaluación de cada criterio general a partir de los factores internos

Si los factores se han agrupado por ámbitos o temáticas, además de puntuar cada uno de los atributos de cada factor, es necesario agregar la información obtenida de todos los factores dentro de cada ámbito.

El procedimiento más común consiste en aplicar misma metodología que para la valoración general; esto es, dentro de cada clúster, se ponderan los diferentes subcriterios y el valor de todos ellos se agrega por medio de una suma o media ponderada. Sin embargo, no hay razón para que el sistema de agregación interna del ámbito tenga que ser necesariamente el mismo que el general.

El tipo de información manejada dentro de un ámbito o criterio general puede diferir mucho de la que se analice en los otros y, en consecuencia, los sistemas de agregación de la información que se empleen en cada uno de ellos pueden ser también distintos. Por ejemplo, se podría entender que cualquier factor que afecte a la efectividad del tratamiento es limitante del tratamiento de forma total y, por tanto, el valor en este criterio general vendría determinado la peor de las valoraciones de los factores considerados. En otros ámbitos, incluso, se podría entender que existen efectos sinérgicos entre varios factores por lo que una agregación multiplicativa respondería más adecuadamente al efecto combinado que una aditiva.

5.9 PROPUESTA DE ALGORITMO DE INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para obtener un valor global de cada alternativa, en esta metodología se propone un método aditivo, donde se sumarían los valores obtenidos del producto de la valoración de cada criterio por su peso obteniendo en un resultado general para cada línea de tratamiento. En la siguiente ecuación se representa el algoritmo adoptado.

$$\text{Resultado } A_i = \sum_n^{j=1} P_j \cdot a_{ji}$$

Donde

P_j son los pesos asignados en la ponderación de cada criterio

a_{ji} son las valoraciones realizadas de cada línea de tratamiento para cada criterio

Una forma alternativa de este modelo aditivo sería la media ponderada, donde la suma de todos los productos se divide por el peso total. Este algoritmo sería equivalente a haber determinado los pesos como porcentajes del total y realizar luego la suma anterior.

Preferiblemente las valoraciones de cada uno de los criterios estarán normalizadas, ajustándose a una escala común y los pesos se introducirán como porcentajes del total, sumando en total el 100%. De esta manera la valoración general tendrá también un valor máximo equivalente al de cada uno de los ámbitos. Con este procedimiento normalizado, se tiene un control más sencillo sobre el peso que cada criterio va a tener sobre la decisión final y se evalúan más fácilmente todos los criterios de forma comparativa.

5.10 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS FINALES

5.10.1 Realización de los cálculos de puntuación

Una vez establecido el modelo de decisión, podrá realizarse la valoración de cada una de las alternativas. Para ello, se podría seguir el procedimiento de valorar cada alternativa de forma completa, en todos los factores, hasta obtener el resultado final. Sin embargo, con este procedimiento de puntuación “vertical” se pueden perder las referencias e incurrir en errores de puntuación, al considerar aspectos o matices diferentes cada vez que se valora el mismo factor para distintas alternativas, pues es difícil poder acotar y detallar todos estos matices antes de que se inicie el proceso de valoración. Por ello, resulta más recomendable realizar una puntuación “horizontal”, factor por factor, para todas las alternativas en paralelo. Una vez realizada la valoración completa de todas las alternativas para un factor, se pasará al siguiente. De esta forma la evaluación se realiza comparando

unas alternativas con otras y se logrará una homogeneidad mayor en las cuestiones que tienen en cuenta al valorar.

Asimismo, se recomienda seguir un procedimiento ordenado en la sucesión de criterios, finalizando la valoración de todos los factores incluidos en un ámbito antes de pasar al siguiente, con objeto de tener claro que dentro de un ámbito se han valorado todos los aspectos que son importantes. Igualmente es recomendable seguir un orden en la sucesión de criterios generales, de tal forma que, si hay dos ámbitos que pudieran estar más relacionados, como la sostenibilidad técnica y la sostenibilidad económica, se valoren uno a continuación del otro para asegurar que no se estarían valorando doblemente los mismos aspectos o que se queda fuera algún aspecto importante. En cualquier caso, convendría, una vez finalizada la valoración completa, volver a revisarla por si se ha podido producir un doble conteo de algún aspecto.

En todo el proceso de valoración de los atributos es absolutamente imprescindible ir registrando las principales razones que han llevado a determinar la puntuación en cada caso, a partir de los aspectos valorados en relación con cada atributo. Estas justificaciones serán las que dan validez al proceso, demostrando que carece de sesgo intencionado. Además, permitirán la verificación de que no existen dobles contabilidades.

Una vez que se ha valorado cada factor por separado, se integrarán sus puntuaciones para obtener la puntuación de su ámbito correspondiente y finalmente, cada uno de los ámbitos ponderados se incluirán en la matriz general de resultados como la que se muestra en la siguiente figura 14, donde:

- $C_1 \dots C_n$ son los criterios de selección
- $P_1 \dots P_n$ son los pesos asignados en la ponderación de cada criterio
- $A_1 \dots A_m$ son las líneas de tratamiento evaluadas en la matriz de decisión
- $a_{11} \dots a_{mn}$ son las valoraciones realizadas a cada línea de tratamiento para cada criterio
- $V_{11} \dots V_{mn}$ son la resultante de multiplicar las valoraciones realizadas para cada línea de tratamiento para cada criterio por el peso asignado para al criterio correspondiente

Alternativas

		A_1	A_2	...	A_i	...	A_n
Criterios	C_1	$V_{11}=P_1 \cdot a_{11}$	$V_{12}=P_1 \cdot a_{12}$	...	$V_{1i}=P_1 \cdot a_{1i}$	...	$V_{1n}=P_1 \cdot a_{1n}$
	C_2	$V_{21}=P_2 \cdot a_{21}$	$V_{22}=P_2 \cdot a_{22}$	...	$V_{2i}=P_2 \cdot a_{2i}$	...	$V_{2n}=P_2 \cdot a_{2n}$

	C_j	$V_{j1}=P_j \cdot a_{j1}$	$V_{j2}=P_j \cdot a_{j2}$	...	$V_{ji}=P_j \cdot a_{ji}$	...	$V_{jn}=P_j \cdot a_{jn}$

	C_m	$V_{m1}=P_m \cdot a_{m1}$	$V_{m2}=P_m \cdot a_{m2}$	...	$V_{mi}=P_m \cdot a_{mi}$	...	$V_{mn}=P_m \cdot a_{mn}$

Figura 14. Matriz de decisión

5.10.2 Análisis de los resultados

Valor general agregado

Disponiendo de toda la información de las puntuaciones y pesos en la matriz de selección, se podría obtener una puntuación global para cada una de las líneas de tratamiento estudiadas. Para obtener el valor general de cada alternativa, en la metodología propuesta se sumarían los valores obtenidos del producto de la valoración de cada criterio por su peso (denominados como “V” en la figura 14) obteniendo un resultado general para cada línea de tratamiento.

Se debe recordar que no tiene por qué existir una única solución. Si dos o más alternativas tienen valoraciones finales semejantes, a partir de la comparación de los aspectos en que más se diferencien o en base a algún criterio que se considere que tenga especial valor, que suele ser la preferencia del operador, se podrá tomar la decisión definitiva.

La mayor utilidad del valor general es permitir la comparación entre alternativas, identificando cuál o cuáles de las líneas de tratamiento pueden presentar más aspectos favorables en el caso concreto de estudio. Para que estos resultados puedan ser interpretadas en términos absolutos de sostenibilidad, deberían valorarse todos los factores, independientemente de que fueran importantes para la selección.

Cuando el resultado sea muy elevado o muy bajo para todas las alternativas y no se trate de líneas muy similares, pudiera ser debido a que los sistemas de valoración no se han construido adecuadamente, resultando demasiado laxos o demasiado estrictos, laminando las diferencias entre alternativas, por lo que sería conveniente confirmar que esto no sucede.

Aunque de una manera rigurosa las valoraciones obtenidas no se pueden interpretar como indicadores de la sostenibilidad, cuando los resultados están mostrando que ninguna de las alternativas sale valorada favorablemente, debería entenderse como una advertencia de que la sostenibilidad del proyecto puede estar comprometida, sea cual sea de la solución elegida. En ocasiones, cuando sobre un problema local confluyen factores contradictorios, lo más probable es que no haya ninguna alternativa que obtenga una puntuación muy elevada. Volviendo al ejemplo expuesto al final del apartado 5.6 y figura 12 (pequeña población, prestador de capacidades limitadas, terreno pequeño y próximo a actividades turísticas) la valoración final arrojaría un mal resultado global para todas las alternativas, ya que ninguna tecnología disponible puede responder adecuadamente a todos los factores determinantes de este contexto. En estos casos, como se ha dicho, para encontrar una solución sostenible no bastará con elegir una tecnología determinada, sino que será necesario actuar sobre los factores que la condicionan, modificando el problema (cambiar el terreno seleccionado por otro de mayores dimensiones y más alejado de instalaciones sensible; reforzar al prestador para que pudiera hacer frente a tecnologías más sofisticadas; dotarle de elementos que permitan reducir costos, etc.).

Análisis de los criterios más determinantes

Las limitaciones del modelo que se señalaron en el apartado 5.7.2 también determinan que, para el análisis adecuado del problema, van a ser tan importantes los resultados parciales por criterios como el valor general, especialmente en situaciones complejas donde puede haber resultados extremos para diferentes factores. Como se dijo, en el análisis final, con los resultados en la mano, se podrían replantear las ponderaciones si existieran casos extremos.

Pero incluso, en otros muchos casos, sin llegar a esas situaciones, los análisis parciales de determinados factores pueden ser tanto o más útiles para sostener la decisión final que un valor único, que puede resultar muy poco representativo del problema.

Frecuentemente las valoraciones finales vendrán determinadas por unos pocos factores, por lo que merecerá la pena realizar un análisis un poco más detallado de los mismos para afianzar la decisión. Con objeto de facilitar este análisis se pueden generar otros resultados, como serían las tablas resumen para cada criterio general o ámbito, donde se muestre la valoración de cada una de las alternativas, lo que permite compararlas entre sí de una forma sencilla.

Tabla 4. Ejemplo de resultados de análisis de criterios

CRITERIO C_j			
Línea de tratamiento	Valoración (a)	Ponderación (P)	Total (V)
A1	a_{1j}	P_j	$P_j * a_{1j}$
A2	a_{2j}	P_j	$P_j * a_{2j}$
...
A_m	a_{mj}	P_j	$P_j * a_{mj}$

Incluso, si puede servir de apoyo para la toma de decisiones o para su justificación, se podrían realizar análisis más detallados dentro de algún ámbito de interés, donde se muestren las puntuaciones asignadas a cada alternativa respecto a cada factor que compone ese ámbito.

5.10.3 Análisis de sensibilidad

El análisis de alternativas de tratamiento presenta una serie de incertidumbres que es necesario conocer para poder ser consciente de la robustez de los resultados. Las incertidumbres respecto a los resultados pueden derivar de varias fuentes:

- **Carencias de conocimiento.** Un conocimiento limitado o parcial del problema, de los condicionantes locales o de las alternativas posibles puede derivar en la interpretación incorrecta de las circunstancias y, por tanto, en una valoración inapropiada de las alternativas. La única solución para reducir esta incertidumbre es conocer bien las alternativas de tratamiento y contar con estudios adecuados sobre la situación local. Pero, incluso cuando se realizan los mejores estudios posibles, hay incertidumbres que van a ser inevitables. Por ejemplo, cuando la planta de tratamiento se está estudiando en un momento en el que todavía no se cuenta con la red de saneamiento, no se puede tener certeza sobre las características que tendrán las aguas residuales, basándose los estudios en una estimación. Tampoco en ningún caso se tendrá certeza sobre las proyecciones futuras de la población ni sobre los riesgos que puedan derivarse de cambios institucionales, de cambio climático o de situaciones de crisis energéticas, de materiales o económicas futuras, nacionales o internacionales.
- **Medición de los atributos.** En cuanto a las alternativas, si la medición de los atributos se está realizando de forma cualitativa, se introduce cierta subjetividad en la medida. En este caso las calificaciones deberían estar sostenidas en la literatura técnica y científica para evitar un sesgo. Pero también en atributos cuantitativos se produce incertidumbre si se emplean sistemas diferentes para medir en cada alternativa. Por ejemplo, en muchos estudios de alternativas la estimación de costos de las diferentes líneas de tratamiento se realiza a partir de fuentes de

información diferentes. Por ejemplo, el costo de la línea de RAFA se extrae de un reciente proyecto de construcción similar en una población cercana; el costo de la línea de lodos activos de una curva de costos elaborada en un país vecino para este tipo de tecnologías y el costo de la línea de filtros percoladores, como no hay referencia, se realiza una aproximación a partir de un prediseño de la instalación. Una disparidad de métodos de este tipo invalidaría completamente la comparación. Ha de insistirse en la realización de procedimientos homogéneos de medida para lograr la comparabilidad y que necesariamente estén basados en las condiciones locales.

- **Construcción del modelo de decisión.** Respecto a la construcción del modelo, la subjetividad entra en la identificación de los criterios, en su agrupamiento, en la ponderación de su importancia y en los sistemas de puntuación de los factores. Cuanto más consensuados entre todos los agentes interesados estén estos elementos que introducen la subjetividad, más responderá el modelo de decisión al entendimiento general del problema. Pero, aun así, existirá incertidumbre puesto que, si el estudio hubiera contado con otros responsables o si los representantes de los diferentes agentes hubieran sido otras personas, los resultados podrían no haber sido exactamente iguales.

El responsable del análisis de alternativas ha de ser consciente de todas estas fuentes de incertidumbre y debería tratar de contribuir lo menos posible a incrementarla. Además, en función de cómo sean los resultados del análisis de alternativas, podría seguir diferentes procedimientos para analizar la sensibilidad y comprobar así la robustez de las decisiones a adoptar.

De lo primero que debe ser consciente es que, con la gran cantidad de factores que influyen en el tratamiento de aguas residuales y las incertidumbres de todo el proceso, si dos alternativas se encuentran muy próximas en la valoración, deberían considerarse igualmente idóneas. No tiene que haber un empeño en tratar de desarrollar algoritmos hasta la extenuación para que se identifique exclusivamente a una de ellas como la alternativa idónea, porque las incertidumbres del análisis no lo permiten y porque pueden ser varias las soluciones apropiadas. Por tanto, en los casos en que dos soluciones resulten muy cercanas en la valoración, es probable que un análisis de sensibilidad no permita discriminarlas.

Si otro grupo de alternativas están muy distanciadas, tampoco un análisis de sensibilidad será de interés porque muy probablemente, aunque se planteen otros escenarios muy distintos, la situación no va a cambiar tan radicalmente como para dar un vuelco a la clasificación.

Las situaciones más complejas se dan cuando entre alternativas hay una distancia significativa, pero puede haber la duda de si la situación hubiera sido diferente con otra valoración o con otra ponderación o con otra concentración en las aguas residuales, etc. En estos casos se pueden realizar diferentes análisis de sensibilidad modificando el valor de diferentes variables. El análisis puede ser ciego, oscilando todo tipo de valores y generando escenarios que luego se evalúan de manera estadística o puede ser dirigida a aquellas variables que presenten más incertidumbre o que tengan un peso importante en la decisión. Bajo esta última perspectiva se pueden generar diferentes escenarios modificando ponderaciones, puntuaciones e, incluso, mediciones de los atributos para diferentes factores, siempre dentro del rango de lo lógicamente admisible. Los factores a modificar se pueden seleccionar por diferentes conceptos:

- Por ser los criterios más abiertos a la interpretación subjetiva.
- Por ser donde más disparidad de criterio se produjo entre los agentes que intervienen en la decisión.

- Por ser los que más han condicionado los resultados (criterios con más influencia en la decisión final).

Además, se puede tratar de evaluar cuál sería el resultado si se produce alguno de los riesgos que se hayan identificado o alguna de las previsiones realizadas no se produce en la medida prevista (por ejemplo, diferentes características de las aguas, diferente crecimiento de la población, etc.). En este caso no se estaría valorando la robustez del método sino el acierto de la solución en el caso de que las previsiones futuras no sean las que se estimaron.

En todos estos casos será necesario repetir todos los cálculos y valoraciones, por lo que es fundamental contar con hojas de cálculo donde los nuevos escenarios puedan generarse con agilidad. Las comparaciones entre el orden de clasificación para diferentes escenarios de puntuación y ponderación darán una indicación del nivel de confianza que se puede dar a los resultados.

6 ANÁLISIS DE LOS CRITERIOS MÁS HABITUALES.

En este capítulo se describen y detallan los factores que más habitualmente condicionan el análisis de alternativas de tratamiento. Asimismo, se exponen algunos ejemplos sobre cómo evaluar su importancia en función de diferentes situaciones que se pueden presentar y sobre cómo puntuarlos a partir de los atributos de las diferentes alternativas.

Aunque puede haber circunstancias locales que introduzcan nuevas variables, generalmente los aspectos que han de tomarse en consideración en la mayor parte de las situaciones van a ser los siguientes:

1. Condicionantes del tratamiento
 - a. Calidad requerida del efluente
 - b. Calidad requerida en el lodo
 - c. Variables ambientales
 - i. Temperatura
 - ii. Altitud
 - d. Características del agua residual a tratar
 - i. Concentración de contaminantes
 - ii. Variabilidad de las características
2. Condicionantes de la construcción
 - a. Características del terreno donde se ubicará la PTAR
 - i. Superficie disponible
 - ii. Características topográficas
 - iii. Características geotécnicas
 - iv. Inundabilidad
 - b. Disponibilidad de elementos necesarios para la construcción
 - i. Materiales necesarios
 - ii. Tecnología y equipos necesarios
3. Sostenibilidad técnica
 - a. Complejidad de operación y mantenimiento (capacidad del operador)
 - b. Accesibilidad a equipos de repuesto y mantenimiento especializado
4. Sostenibilidad económica
 - a. Costos de construcción
 - b. Costos de operación y mantenimiento
 - i. Consumo energético
 - ii. Producción y características de los lodos (opciones para su disposición)
5. Sostenibilidad social
 - a. Aceptación por parte de la población
 - b. Impactos potenciales sobre la población y actividades económicas
 - i. Ruidos
 - ii. Olores
 - iii. Impacto visual
 - c. Aceptación por parte del prestador del servicio
6. Sostenibilidad ambiental
 - a. Emisión de gases de efecto invernadero
 - b. Balance energético
 - c. Valorización de lodos

d. Reutilización de aguas

Estos factores se han organizado por ámbitos o criterios generales, representando lo que sería un árbol de valores y los apartados de este capítulo se han organizado siguiendo la misma estructura. Se recuerda que la agrupación por ámbitos es deseable para poder calibrar más fácilmente el peso que ha de tener cada factor en la decisión final. No obstante, en cada caso concreto, aunque pueda tomarse de referencia esta estructura, pudiera ser más adecuado organizar los factores de otra manera, integrando varios de ellos en un ámbito mayor o, al contrario, separándolos en varios grupos.

En cada subapartado se considerará un solo factor, para el que primero se expondrá su razón de ser y sus características y posteriormente se analizará en sus dos facetas:

- Respecto al interés que ese factor pueda tener dentro del contexto local, es decir, como resultado de los objetivos del proyecto y de los condicionantes existentes, lo que determinará su importancia en el análisis. Para la mayor parte de los factores se presenta un análisis de posibles escenarios de contexto que condicionarían la importancia del factor. Las clasificaciones propuestas analizan exclusivamente el propio factor, por lo que no se debe confundir con una propuesta de ponderaciones, porque para determinar el peso que debería tener en la decisión final, se ha de comparar con los demás factores.
- Respecto a cómo la tecnología responde a ese factor, con objeto de identificar los atributos que mejor permiten evaluar las alternativas y los métodos que se pueden seguir para realizar la puntuación. Para su comprensión, en muchos de los factores se exponen tablas de medición de atributos.

6.1 CONDICIONANTES DEL TRATAMIENTO

Este grupo de factores abarca todos los aspectos asociados a la eficacia requerida en el proceso de tratamiento. En concreto los cuatro criterios propuestos, calidad requerida del efluente, características del agua residual a tratar, variaciones de caudal y carga y variables ambientales, se analizan en los siguientes subapartados. Aunque estos factores se analicen de manera separada en este texto, realmente formarían parte de la sostenibilidad técnica de la instalación, junto con las capacidades del operador para operar las instalaciones adecuadamente.

Partiendo del conocimiento de las diferentes tecnologías se podrá determinar las líneas de tratamiento que alcancen los rendimientos necesarios, así como sus condiciones de diseño y operación. Por tanto, la influencia de la mayor parte de estos factores se podrá traducir en costos de construcción y en complejidad y costos de operación y mantenimiento. Sin embargo, para algunos de ellos resultará complicado realizar esta traducción y tendrán que analizarse como un factor independiente, dentro de la sostenibilidad técnica.

6.1.1 Calidad requerida del efluente

La calidad del efluente, que generalmente viene determinada por la normativa vigente y se establece por las autoridades competentes en la autorización de la descarga, es un aspecto básico porque la línea de tratamiento seleccionada debe tener capacidad para alcanzar dicha calidad, partiendo de las características del agua de entrada. Sería un factor impuesto por los objetivos del proyecto que, a su vez, vienen condicionados por el destino de las aguas tratadas y la normativa que regula estos posibles destinos.

Este factor tiene, por tanto, un carácter limitante en todos los casos y por tanto condiciona incluso la selección de alternativas viables. Aquellas líneas de tratamiento que no son capaces de alcanzar los rendimientos necesarios para todos los parámetros que incluye la normativa correspondiente, no pueden considerarse como soluciones viables y deben ser descartadas.

En muchos de los estudios de alternativas la calidad del efluente no se empleará más que con este carácter limitante, no considerándose posteriormente en la valoración de las alternativas puesto que todas ellas deben cumplir. Sin embargo, en ocasiones, este factor podría formar también parte del proceso de valoración de las tecnologías. Por ejemplo, si el vertido se realiza a una zona especialmente sensible o protegida, o destinada a determinados usos y se considera que la eliminación de contaminantes por encima de lo exigido en la normativa puede aportar beneficios claros. No obstante, no suele ser en general un factor al que se le dé un peso importante, una vez que todos los procesos evaluados cumplan con la normativa de calidad establecida.

En los siguientes epígrafes se analiza el caso en el que la calidad de las aguas se haya considerado como un factor de valoración.

Importancia

Desde la perspectiva de las circunstancias locales, será necesario conocer las concentraciones de los contaminantes en el agua residual a tratar, la sensibilidad o condicionantes especiales que pueda tener el cuerpo receptor y los límites de vertido que se desearía alcanzar si pueden ser más exigentes que los especificados en la normativa general.

A continuación, se incluyen una serie de consideraciones sobre posibles situaciones que se pueden encontrar y donde este criterio tendrá más o menos importancia para la decisión.

Tabla 5. Análisis de situaciones donde se valora el factor de “calidad requerida del efluente”

Muy importante

Por motivaciones de imagen (zonas turísticas, por ejemplo) o de preservación del medio donde se vierte o de los usos que se realizan aguas abajo, es un objetivo del proyecto alcanzar unos rendimientos de depuración mayores a los especificados en la normativa.

Importante

Por motivaciones de imagen o de preservación del medio donde se vierte se considera deseable alcanzar unos rendimientos de depuración mayores a los especificados en la normativa.

Influye en la decisión

Aunque no exista más necesidad que cumplimiento de la norma, los caudales y cargas contaminantes de las bases de proyecto se han determinado mediante estimaciones o campañas analíticas inadecuadas, por lo que existe cierta incertidumbre al respecto (unido a la incertidumbre en la evolución de las características del proyecto en el año horizonte).

Cuando existe esta incertidumbre resulta conveniente contar con procesos que puedan alcanzar un mayor rendimiento del estrictamente requerido a partir de las estimaciones.

Intrascendente

No existe ninguna expectativa adicional más allá del cumplimiento normativo.

Los caudales y cargas contaminantes utilizados para los prediseños se han determinado mediante campañas analíticas adecuadas, por lo que existe suficiente certeza al respecto, o los prediseños realizados son bastante holgados para el año horizonte.

Atributos y puntuación

En lo que respecta a las tecnologías, los aspectos que deberían conocerse serían los rendimientos que es posible alcanzar por las líneas de tratamiento propuestas para cada uno de los contaminantes de interés en el caso. En la tabla siguiente se establecen los rangos de rendimientos de depuración que habitualmente alcanzan algunas líneas de tratamiento para SS, DBO₅, DQO, NH₄, NT, PT y CF,

Tabla 6 Niveles de tratamiento alcanzado según la tecnología implantada, tomado de AECID, 2021 y adaptado por los autores

Línea de tratamiento	Nivel de tratamiento	Rendimientos (%)						(ulog)
		SS	DBO ₅	DQO	N-NH ₄ ⁺	NT	PT	CF
Fosa séptica o Tanque Imhoff	1 ^{ri}	50-60	20-30	20-30	-	-	-	0
Decantación primaria	1 ^{ri}	60-65	30-35	-	-	-	-	0
Fosa séptica + FAFA	>1 ^{ri}	60-90	40-75	40-70	-	-	-	1-2
RAFA	>1 ^{ri}	50-70	70-80	60-70	-	-	-	0
Lagunas de estabilización	2 ^{ri} *	40-80	75-85	70-80	30-70	20-70	10-50	2-3
RAFA + Laguna	2 ^{ri} *	70-80	80-90	75-85		10-25	10-15	2-3
Humedal de flujo horizontal	2 ^{ri}	90-95	85-90	80-90	20-25	20-30	20-30	1-2
Humedal de flujo vertical	2 ^{ri} nitrificación	90-95	90-95	80-90	60-70	60-70	20-30	1-2
Lombrifiltros	2 ^{ri}	90-95	90-95	85-90		15-20	20-30	1-2
Filtro de arena	2 ^{ri} nitrificación	90-95	90-95	80-90	70-80	40-50	15-30	2-3
Infiltración-Percolación	2 ^{ri} nitrificación	90-95	90-95	80-90	70-80	40-50	15-30	2-3
Filtros percoladores	2 ^{ri} o 2 ^{ri} nitrificación**	85-95	85-95	80-90		20-35	10-35	1
RAFA + Filtro percolador	2 ^{ri}	85 - 95	85 - 90	80 - 85	60-80	20-30	10-20	1
CBR	2 ^{ri} o 2 ^{ri} nitrificación**	85-95	85-95	80-90		20-35	10-35	1
RAFA + CBR	2 ^{ri}	85 - 95	85 - 95	80 - 90	60-80	20-30	10-20	1
Aireación Extendida	2 ^{ri} nitrificación o 2 ^{ri} elimina N**	85-95	85-95	80-90	90-95		20-30	1
Reactores Secuenciales	2 ^{ri} nitrificación o 2 ^{ri} elimina N**	> 90	> 90	80-90	90-95		80-85	1
						80-85	55-65	

* El Lagunaje no cumple estos requisitos si no es en una muestra filtrada, debido a la presencia de microalgas en el efluente.

** Según cómo se diseñe el proceso se alcanza uno u otro nivel de tratamiento.

En los casos en los que la calidad del efluente sea un factor a valorar, la puntuación podrá realizarse en función de los niveles de calidad que alcanzaría cada alternativa para cada contaminante que se considere importante en el caso, bien en función de la mejora que suponga sobre el nivel exigido en la normativa general o bien, si se ha establecido un objetivo de calidad ideal, en función de la cercanía a este objetivo.

6.1.2 Calidad requerida en el lodo

Dependiendo de la disposición que se vaya a realizar del lodo generado en la planta de tratamiento va a requerir del cumplimiento de determinados parámetros, generalmente referidos a la sequedad, estabilización (contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable), contenido en metales pesados y tóxicos e higienización (contenido en patógenos).

Cuando no exista una regulación al respecto y los lodos se van a aplicar en agricultura, la calidad de éstos puede ser un factor que condicione el análisis de alternativas. Cuando sí existe legislación se deberá tomar como un factor limitante de las líneas de tratamiento propuestas.

Desde la perspectiva de las condiciones locales será necesario determinar cuál será la disposición final del lodo y los condicionantes impuestos por la legislación al respecto. Asimismo, se debe conocer el contenido en metales pesados de las aguas residuales o, en su defecto, la presencia de vertidos industriales en la red que puedan provocar un elevado contenido en metales.

Desde la perspectiva de las tecnologías será necesario conocer la influencia de los procesos unitarios de la línea de aguas y de la línea de lodos sobre las características y producción de lodos generados. En función de los requisitos impuestos en cada caso se podrá valorar la idoneidad de las diferentes líneas al respecto.

6.1.3 Características del agua residual a tratar

Las características del agua residual, en lo referente al nivel de concentración de contaminantes y origen de la contaminación y a la variación de caudales y cargas, es otro factor que inevitablemente se ha de tener en cuenta a la hora de seleccionar la tecnología.

6.1.3.1 Concentración de contaminantes

Algunos tratamientos se adaptan mejor que otros a los distintos niveles de contaminación que presenta el agua residual. Por ejemplo, los filtros percoladores trabajan mejor con aguas diluidas mientras que los procesos anaerobios funcionan muy bien con aguas muy concentradas.

Por otra parte, si el agua cuenta con aportes de efluentes industriales, se podrían generar condiciones indeseables en el agua a tratar que, aunque se produjeran de manera momentánea o esporádica, podría afectar en mayor o menor medida a alguno de los procesos, haciendo necesario incluir un tanque de homogeneización en la línea de proceso. Así, son habituales las variaciones en pH o salinidad a la entrada de la PTAR en poblaciones con aportes industriales significativos.

Asimismo y como se ha dicho, algunos contaminantes tóxicos pueden pasar a los lodos en el proceso de tratamiento, limitando su utilización en agricultura.

Importancia

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer, además de las concentraciones de los contaminantes en el agua residual a tratar, la composición y caudal de los vertidos singulares descargados en la red, así como la frecuencia de estas descargas.

A continuación, se muestra una evaluación de la importancia del factor “contaminantes del agua residual a tratar” en función de una serie de circunstancias locales.

Tabla 7. Análisis de la importancia del factor “contaminantes del agua residual a tratar” en función de las circunstancias locales

Muy importante
Existe un riesgo significativo de que en determinados momentos o épocas del año se puedan superar los valores límites de sustancias inhibidoras debido a vertidos industriales o de otra tipología.
<p>Importante</p> <p>Las características del agua residual a tratar son atípicas en cuanto a concentración de materia orgánica (muy altas o muy bajas) y, además, existe una incertidumbre importante respecto a la concentración de contaminantes, por ejemplo, por haberse determinado mediante estimaciones o campañas analíticas inadecuadas.</p>
<p>Influye en la decisión</p> <p>Las características del agua residual a tratar son atípicas en cuanto a concentración de materia orgánica.</p>
<p>Intrascendente</p> <p>Las características del agua residual a tratar son típicas en cuanto a concentración de materia orgánica (150-500 mg DBO₅/L y 300-1 000 mg DQO/L)</p>

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías, el aspecto principal a conocer sería la capacidad de adaptación de las distintas líneas evaluadas a las concentraciones de los contaminantes que tenga el agua a tratar. En la tabla siguiente se recogen los valores límite de sustancias inhibidoras para procesos biológicos en general.

Tabla 8. Valores límite de sustancias inhibidoras para procesos biológicos. (EPA-430/9-76-017)

Contaminante	Concentración límite (mg/L)	
	Eliminación materia orgánica	Nitrificación
Aluminio	15 a 16	
Amoníaco	480	
Arsénico	0,1	
Boro	0,05 a 100	
Cadmio	10 a 100	
Calcio	2.500	
Cromo hexavalente	1 a 10	0,25

Contaminante	Concentración límite (mg/L)	
	Eliminación materia orgánica	Nitrificación
Cromo trivalente	50	
Cobre	1,0	0,05 a 0,5
Cianuro	0,1 a 5	0,34
Hierro	1.000	
Plomo	0,1	0,5
Manganeso	10	
Magnesio	1 a 10	50
Mercurio	0,1 a 5,0	0,25
Níquel	0,1 a 2,5	0,25
Plata	5	
Sulfatos		500
Zinc	0,08 a 1	0,08 a 0,5

Debido a estas limitaciones, sobre todo si hay un contenido importante de aguas industriales, resulta muy importante hacer una caracterización completa del agua residual, así como conocer la naturaleza de vertidos existentes al margen de los domésticos en la fase de estudios previos.

No todos los procesos tienen la misma capacidad de adaptación ante la presencia de vertidos industriales, siendo los procesos de lodos activos los que presentan una mayor capacidad de adaptación, siempre que el nivel de componente industrial sea limitado y no genere concentraciones de tóxicos excesivamente elevadas para la biomasa activa.

Ante vertidos puntuales de carácter tóxico que afecten severamente al proceso biológico, las tecnologías de biopelícula presentan mayor capacidad de recuperación que las de biomasa en suspensión. Los procesos anaerobios, por el contrario, tienen periodos de puesta en marcha muy prolongados, por lo que una afectación grave supondría un trastorno durante muchos meses.

La puntuación en este caso es habitual que se realice a partir de una estimación cualitativa del atributo. La siguiente tabla muestra la clasificación de algunas líneas de tratamiento en cuanto a su capacidad de adaptación ante distintas concentraciones de materia orgánica en el agua a tratar.

Tabla 9. Comportamiento de algunas líneas de tratamiento en función del nivel de concentración de las aguas residuales a tratar (Adaptada de MMAyA, 2021)

Tipo de agua residual	Línea de tratamiento		
	Muy adecuada	Adecuada	Menos adecuada
Contaminación fuerte (500-700 mg/L de DBO ₅)	RAFA+LAG / RAFA+FP / RAFA CBR / AE	HUMv / LOMB / FAFA / FP y CBR de doble etapa	LAG / HUMh / FP y CBR de una etapa
Contaminación débil (< 150 mg/L de DBO ₅)	LAG / HUMh / HUMv / LOMB / FP / CBR	FAFA	RAFA+LAG / RAFA+FP / RAFA+CBR / AE

Si la alteración del influente consiste en valores puntualmente altos de pH, temperatura, salinidad u otro parámetro que se pueda compensar, la capacidad de asimilación de una línea de tratamiento se puede mejorar con la implantación de un tanque de homogeneización en cabecera de la instalación o antes del proceso que sea sensible a esas variaciones. En estos casos el tanque ha de ser considerado como un elemento necesario dentro de esa línea a efectos de estimar costos de construcción y mantenimiento.

6.1.3.2 Variaciones de caudal y carga

Como se ha visto, las características del agua residual no solo pueden variar de una forma importante de un lugar a otro, sino que también pueden presentar importantes variaciones horarias, diarias o estacionales. Este factor puede ser especialmente relevante en las pequeñas poblaciones que por sus características suelen sufrir importantes variaciones a lo largo del día. También los episodios lluviosos alteran de manera considerable los caudales que recibe la PTAR, así como las concentraciones de contaminantes. Incluso la temperatura del agua puede sufrir una variación importante por este motivo, lo que podría tener influencia importante en algunos procesos y debería también tomarse en consideración.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer:

- Los caudales y cargas punta horarios
- Los caudales mínimos
- Las posibles variaciones estacionales que alterarían el caudal y la carga habituales debido a diferentes circunstancias, como puede ser: turismo estacional, contar con aportes de industria agroalimentaria o por eventos puntuales que tienen lugar recurrentemente
- La pluviometría y el tipo de red de saneamiento, ya que una red combinada se verá mucho más afectada por el efecto de las lluvias.

Para ello resultará imprescindible poder realizar una campaña analítica para caracterizar las aguas a tratar o, de no ser posible, poder conocer con la mayor precisión posible todos los aportes que van a llegar a la red de saneamiento.

A continuación se muestra una evaluación de la importancia del criterio “variaciones de caudal y carga” en función de las circunstancias locales.

Tabla 10. Análisis de la importancia del factor “variaciones de caudal y carga” en función de la situación local

Muy importante

Pequeñas poblaciones donde no hay previsto ningún elemento de laminación de caudal previo a la PTAR y que, además, cuenten con un riesgo significativo de que el vertido intermitente de una actividad singular pueda causar variaciones sustanciales con respecto a los valores medios esperados.

Importante

Pequeñas poblaciones donde no hay previsto ningún elemento de laminación de caudal previo a la PTAR o poblaciones que cuenten con un riesgo significativo de que el vertido intermitente de una actividad singular pueda causar variaciones significativas con respecto a los valores medios esperados.

Poblaciones con un marcado carácter turístico que sufren una variación de población muy importante en determinadas épocas del año.

Influye en la decisión

Poblaciones que no cuentan con elementos de laminación de caudal previos a la PTAR y en las que, o bien por la reducida extensión de su red de saneamiento, o bien por la intermitencia relativa de los vertidos singulares existentes, cuentan con variaciones de caudal mayores a las habituales.

Intrascendente

Poblaciones de tamaño medio o grande en las que no se prevén variaciones de caudal y carga diferentes a las habituales.

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías, el aspecto principal a conocer sería la capacidad de adaptación del proceso a las variaciones de caudal y de carga. Todas las tecnologías de tratamiento presentan cierta capacidad de adaptación ante las variaciones de caudal o carga que puedan presentarse a lo largo del día, si bien algunas presentan un mejor comportamiento ante las mismas. Este factor tendría en cuenta la flexibilidad de los tratamientos para adaptarse a variaciones importantes, tanto de caudal como de carga, que se pueden experimentar en determinados momentos.

Al igual que se señaló para los aportes anómalos de contaminantes, para aquellas tecnologías que no soporten adecuadamente las variaciones horarias en las características de las aguas residuales, se podrá implantar un tanque de laminación.

Ante situaciones de importante variación de caudal y carga de carácter estacional será necesaria la construcción de varias líneas en paralelo. Al respecto, los tratamientos anaerobios cuentan con la desventaja de que la puesta en marcha tiene un tiempo importante, lo que supone una limitación sustancial. Si bien, la segunda línea de carácter estacional podría contar con un tipo de tratamiento diferente (físicoquímico, por ejemplo). En cada proyecto se deberán concretar las alternativas posibles.

Más problemáticas son las variaciones extremas de caudal y carga asociadas a periodos de tiempo muy cortos, pero recurrentes, como ocurre con la estacionalidad de fines de semana. En estos casos, la biomasa incluso para tratamientos aerobios no siempre es capaz de adaptarse y puede ser necesario recurrir a complementar los tratamientos biológicos con tratamientos físicoquímicos que traten el influente en exceso.

Se suele admitir que los procesos extensivos, debido a las bajas cargas con que se diseñan y al mayor tiempo de permanencia del agua residual en el sistema, presentan una mayor flexibilidad o versatilidad ante este tipo de situaciones. De la misma manera, y dentro de los tratamientos intensivos, también se defiende que la biomasa en los procesos de biopelícula se adapta mejor a las variaciones de carga

que los procesos de lodos activos (Aireación extendida). Dentro de estos últimos, la modalidad secuencial de lodos activos (SBR), ofrece una flexibilidad mucho mayor frente al proceso convencional.

En cualquier caso, la tolerancia a las variaciones de caudal debe evaluarse por línea completa de tratamiento más que por proceso unitario. Por ejemplo, un filtro percolador sin recirculación no soporta bien las variaciones de caudal y podría descartarse por no ser una tecnología adecuada. Sin embargo, si está precedido por una laguna anaerobia con un tiempo de retención hidráulica de 2 días, se puede emplear para laminar las variaciones de caudal, eliminando la afección sobre el filtro percolador. La siguiente tabla muestra una clasificación de líneas de tratamiento en función de su versatilidad al respecto, es decir la tolerancia de las líneas propuestas a variaciones de caudal y carga en las aguas a tratar. En esta clasificación no se tienen en cuenta posibles elementos auxiliares que ayuden a absorber las variaciones.

Tabla 11. Tolerancia a las variaciones de caudal y carga de las aguas a tratar de algunas líneas de tratamiento (MMAyA, 2021)

	Líneas de tratamiento	
	Respuesta a variaciones de caudal	Respuesta a variaciones de Carga
Muy buena	LAG / HUMh	AE / LAG / RAFA+LAG / RAFA+FP / RAFA+CBR
Buena	HUMv / AE	FP / FAFA / CBR
Regular	FP ¹ / FAFA / LOMB / CBR / RAFA+LAG / RAFA+FP ¹ / RAFA+CBR	HUMh / HUMv / LOMB

¹En caso de que los Filtros Percoladores cuenten con recirculación, presentan una mayor flexibilidad ante variaciones de caudal y concentración.

Todos estos aspectos en muchos casos resultan excesivamente complejos como para poder introducirlos en el prediseño de las líneas de tratamiento, más allá de que se pueda decidir incluir un tanque de homogeneización, por lo que este factor se suele valorar de forma independiente al de los costos y en términos cualitativos.

6.1.4 Variables ambientales

Como ya se ha mencionado, hay variables ambientales que pueden condicionar de manera importante la efectividad de algunos procesos de tratamiento. Este sería el caso de la temperatura y la altitud; ambas variables condicionan fuertemente la solubilidad de los gases y aquellos sistemas que requieran de aireación mecánica se verán muy perjudicados a grandes altitudes. Además, la temperatura también condiciona de manera determinante los procesos biológicos, pudiendo incluso constituir, como se ha visto, un factor limitante.

La temperatura ambiente alterará la temperatura de las aguas residuales en su discurrir por la red de saneamiento y en la propia PTAR. Incluso en climas templados, cuando llueve y entran parte de los pluviales a la red, se puede producir un enfriamiento de las aguas, lo que disminuye el rendimiento de los procesos. Por ello en el diseño de los sistemas de tratamiento se suele tomar como referencia la temperatura media del mes más frío.

Otros factores ambientales como la pluviometría, la humedad del ambiente o el promedio de insolación diario serán determinantes de los diseños a considerar en el proceso de lechos de secado. Incluso en zonas en las que la pluviometría sea abundante esta tecnología puede resultar inadecuada,

a no ser que se consideren cubiertos, lo que habría que tener en consideración en el cálculo de los costos de construcción.

Por lo expuesto, las variables ambientales han de tomarse en consideración a la hora de realizar los prediseños de todas las alternativas puesto que pueden tener una incidencia muy grande tanto en los costos de construcción como de operación. En el anexo I se detalla en mayor grado el efecto de las variables ambientales.

6.2 CONDICIONANTES DE LA CONSTRUCCIÓN

6.2.1 Características del terreno

Las características del terreno seleccionado para construir la PTAR y las circunstancias derivadas de su ubicación van a condicionar el proyecto en muchos aspectos como, por ejemplo, las molestias que pueda generar en la población por su cercanía, la sensibilidad ambiental de su entorno y del punto de vertido, la superficie disponible, la topografía, las características geotécnicas, el riesgo de inundación, la accesibilidad o el costo de adquisición, entre otros. Algunas de estas características supondrán un factor limitante en algunos casos y muchas de ellas deberán tenerse en cuenta en la determinación de los costos de inversión y de operación, o en otros factores relevantes como los impactos potenciales que se puedan producir. A continuación se destacan los factores que más van a condicionar la construcción de las instalaciones y sus costos.

6.2.1.1 Superficie disponible

La superficie disponible es, obviamente, un factor limitante a la hora de seleccionar la tecnología de depuración más adecuada, teniendo en cuenta las grandes diferencias existentes entre los procesos extensivos y los intensivos. Generalmente el terreno se ha seleccionado previamente al estudio de alternativas de tratamiento, por lo que únicamente serán viables aquellas líneas de tratamiento cuyos requerimientos de superficie no excedan la parcela disponible. En la mayor parte de las situaciones esta será la única consideración importante sobre la superficie disponible.

Sin embargo, en ocasiones la superficie ocupada por los procesos puede ser también un factor a valorar dentro del estudio de alternativas, bien porque hay posibilidad de ampliar o cambiar el terreno, o bien porque interese ocupar la menor superficie posible, por algún motivo (la superficie restante se destinará a otros usos, es posible comprar solo el terreno que realmente se necesite, etc.).

El costo del terreno, por ejemplo, suele ser un motivo que introduce el interés de valorar este factor porque, en muchas ocasiones en las que existe un promotor externo que financia la construcción de la planta, el terreno lo debe aportar la población. Éste es un aspecto que debería estar incluido en los costos de implantación y no de manera independiente. Si se quiere diferenciar del costo que aporta el promotor externo, se podría integrar con los demás factores de la sostenibilidad económica, junto con los costos que debe asumir el prestador.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer la superficie disponible y los usos potenciales de la superficie no ocupada. Aunque en la mayor parte de los casos, como se ha dicho, la repercusión de este factor se puede traducir en costos y no debería ser analizado separadamente, se incluye a continuación, como en otros factores, un análisis de las diferentes situaciones que se pueden presentar y su importancia relativa.

Tabla 12. Análisis de la importancia del factor “superficie disponible” en función de la situación local

Muy importante

Es necesario adquirir el terreno y su costo es muy alto.
El terreno es de propiedad municipal y tiene un costo de oportunidad muy alto por su demanda para otros usos.

Importante

Es necesario adquirir el terreno y su costo es medio.
El terreno es de propiedad municipal y tiene un costo de oportunidad alto.

Influye en la decisión

El terreno es de propiedad municipal y tiene un costo de oportunidad medio-bajo.

Intrascendente

Terreno de propiedad municipal e improductivo donde no se prevé costo de oportunidad alguno durante el horizonte del proyecto.

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías, el aspecto principal a conocer será la superficie ocupada por las distintas líneas de tratamiento, para lo que sería necesario realizar un prediseño de las instalaciones.

Como se ha adelantado, los requerimientos de superficie serán mucho menores para las líneas de tratamiento basadas en tecnologías intensivas (lodos activos o filtros percoladores, por ejemplo) que para las líneas basadas en tecnologías extensivas, como lagunas de estabilización o humedales. Además, las variables ambientales pueden tener una influencia muy notoria en la superficie requerida para una misma tecnología, motivo por el cual es necesario realizar unos diseños básicos de las diferentes alternativas ajustados a la realidad de cada caso.

Con objeto de ilustrar las grandes diferencias en superficie que se pueden encontrar, en la siguiente tabla se muestra el resultado del estudio de la Guía boliviana de selección y diseño de líneas de tratamiento (MMAyA, 2021), donde aparece una estimación de la superficie ocupada por diferentes líneas de tratamiento, en función de la población y en diferentes condiciones ambientales y socioeconómicas. La superficie indicada hace referencia a la totalidad de la instalación, incluyendo otras zonas como edificio de control, viales de paso, etc. Se puede consultar más información sobre el alcance exacto en la referencia correspondiente.

Tabla 13. Estimación de la superficie necesaria (m^2/hab) para algunas líneas de tratamiento (MMAyA, 2021)

Línea	Clima	Población (habitantes)					
		1.000	2.000	5.000	10.000	25.000	50.000
FAFA	Tropical	2,09	1,73	----	----	----	----
RAFA+LAG	Tropical	1,97	1,74	1,46	1,42	1,45	1,64
LAG	Altiplano	4,21	4,55	5,17	5,56	5,21	5,87
	Tropical	1,86	1,76	1,55	1,51	1,62	1,69

HUMh	Altiplano	1,97	2,18	2,4	----	----	----
	Tropical	1,6	1,84	1,82	----	----	----
HUMv	Altiplano	1,29	1,57	1,65	----	----	----
	Tropical	1,04	1,07	1,01	----	----	----
LOMB	Altiplano	0,67	0,55	0,45	----	----	----
	Tropical	0,79	0,65	0,52	----	----	----
FP	Altiplano	0,67	0,55	0,43	0,47	0,33	0,35
RAFA+FP	Tropical	0,53	0,37	0,26	0,23	0,26	0,24
CBR	Altiplano	0,64	0,51	0,41	0,39	0,3	0,35
RAFA+CBR	Tropical	0,6	0,39	0,26	0,23	0,25	0,24
AE	Altiplano	0,69	0,59	0,48	0,46	0,33	0,32
	Tropical	0,73	0,61	0,48	0,47	0,29	0,30

6.2.1.2 Otros condicionantes de la construcción debidos al terreno

En el anexo I se analiza una serie de características de los terrenos que van a condicionar la ejecución de las obras y, por tanto, los costos de construcción y, en ocasiones, también los de operación. Entre estas características se podrían destacar:

- Existencia de camino de acceso o, en su defecto, distancia a caminos o vías desde donde conectar
- Características geotécnicas de los terrenos por donde ha de pasar el camino de acceso.
- Distancia al punto de vertido
- Distancia al enganche de red electricidad y agua potable
- Cota de llegada del agua al predio
- Topografía de la parcela
- Inundabilidad
- Características geotécnicas
- Nivel freático y su evolución a lo largo del año

Entre estas características, las tres primeras condicionarán el costo de las alternativas de la misma manera, pero el resto podrán tener repercusiones diferentes dependiendo de la alternativa tecnológica. A continuación se exponen algunas consideraciones al respecto:

- Las soluciones extensivas y, especialmente las lagunas de estabilización y los humedales superficiales, requerirán de grandes extensiones de terreno relativamente llanas, incrementándose sustancialmente su costo de construcción en otro tipo de terrenos y en terrenos rocosos, debido al movimiento de tierras necesario.
- Terrenos con fuertes pendientes permitirán la implantación de filtros percoladores sin necesidad de incluir bombeos antes del proceso.
- Si se debe proteger una instalación frente a las inundaciones, la dimensión que ocupe será un factor determinante en el costo de la protección.
- Si se requiere realizar excavaciones profundas y construir grandes cubas de tratamiento, las condiciones geotécnicas y el nivel freático condicionarán completamente el costo.

Por tanto, se debe insistir en que las estimaciones de costos de las diferentes alternativas, tanto de construcción como de O&M, se realicen de la manera más adaptada a las condiciones locales posible.

Pero además de su influencia en los costos, debería tenerse en cuenta que, de contar con dificultades constructivas que afecten en mayor medida a una alternativa, la complejidad de ejecución se incrementa y con ello los riesgos de sobrecostos no previstos y de dilación de los plazos de ejecución de las obras. El plazo de la obra y la consecuente puesta en servicio de la PTAR, es también en ocasiones un factor a considerar en el estudio de alternativas.



Figura 15. Construcción del reactor UASB de la PTAR de Granada, Nicaragua

Finalmente, es necesario destacar que, si las especiales condiciones del terreno determinan la modificación de la disposición o el perfil hidráulico típico de la línea de tratamiento, por ejemplo, introduciendo la necesidad de implantar bombeos para posibilitar la construcción de las instalaciones, también tendrá una repercusión en los costos de operación y mantenimiento, que deberá tomarse en consideración al realizar las estimaciones correspondientes.

6.2.2 Disponibilidad de materiales y equipos

En algunas regiones puede haber dificultad para encontrar los materiales necesarios para la construcción de determinados sistemas. Así, por ejemplo, se han visto casos donde no se disponía del material pétreo adecuado para la construcción de filtros percoladores o de humedales subsuperficiales.

Cuando no existe disponibilidad de materiales, así como cuando los equipos o elementos singulares de las instalaciones deben ser importados, son aspectos que también deben tomarse en consideración en la evaluación de los costos de cada alternativa y en el riesgo de dilatar la ejecución de la obra y su puesta en marcha.

6.3 SOSTENIBILIDAD TÉCNICA

En relación con la operación y el mantenimiento de la PTAR hay dos factores importantes a considerar, que son: la disponibilidad de personal suficientemente cualificado para llevar a cabo la operación y mantenimiento de la instalación y la facilidad para disponer de piezas y equipos de repuesto, cuando sea necesario, así como de servicio técnico en aquellas tecnologías que lo requieran.

En general, las pequeñas poblaciones y con prestadores autónomos tendrán más dificultades para atender la sostenibilidad técnica de las instalaciones, convirtiéndose en un factor limitante para muchas alternativas. Su menor disponibilidad presupuestaria limita los medios técnicos y humanos y resulta inviable disponer de técnicos especializados, dedicados en exclusiva al tratamiento. Por tanto, las tecnologías muy sofisticadas no serán recomendables en estos casos.

Una estrategia de agrupación supramunicipal de servicios, bien porque se construya y opere una única PTAR para varias poblaciones, bien porque simplemente se mancomune la gestión de diferentes instalaciones y servicios, permite optimizar recursos y dotarse de personal más cualificado con dedicación exclusiva al tratamiento de aguas. La experiencia ha demostrado que contar con prestadores débiles es uno de los factores que más influye en una operación deficiente de las instalaciones e incluso en su abandono. Por todo ello, si debido a otros factores se viera que es necesario implantar tecnologías que pueden resultar difíciles de sostener técnicamente, el proyecto de desarrollo del servicio debería plantear también soluciones para la mejora de los operadores.

6.3.1 Complejidad de operación y mantenimiento (capacidad del operador)

Los requerimientos de personal cualificado de cada línea de tratamiento dependerán de la complejidad de la operación de los procesos de tratamiento que la conforman y del mantenimiento de sus instalaciones y equipos. En esencia, la cualificación requerida por el personal y las horas de dedicación necesarias repercuten directamente en los costos de O&M por lo que, cuando existe la posibilidad de contratar personal especializado, este aspecto debería incluirse en el análisis simplemente como un elemento más de la estimación de costos de operación y mantenimiento de cada tecnología.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer si existe posibilidad de contar con personal cualificado para operar tratamientos sofisticados, si resulta viable la realización de capacitaciones específicas al personal actual para que puedan asumir este trabajo y si es posible contratar nuevo personal.

A continuación, se diferencian posibles situaciones donde la consideración de este factor sería más o menos importante.

Tabla 14. Análisis de la importancia del factor “requerimientos de personal cualificado” en función de la situación local

Muy importante

Los operadores de los que actualmente dispone el prestador no tienen capacidad suficiente como para desempeñar las labores de operación y mantenimiento de una PTAR con una complejidad tecnológica significativa, incluso recibiendo formación específica. Resulta muy difícil encontrar a personal local que disponga de esta capacidad o no hay recursos económicos para contratar a personal no local cualificado.

Importante

Los operadores de los que actualmente dispone el prestador no tienen capacidad suficiente como para desempeñar las labores de operación y mantenimiento de una PTAR con una complejidad tecnológica significativa, incluso recibiendo formación específica. Aunque no sea sencillo, resultaría viable contratar a personal que disponga de esta capacidad.

Influye en la decisión

Los operadores de los que actualmente dispone el prestador no tienen conocimientos suficientes como para desempeñar las labores de operación y mantenimiento de una PTAR con una complejidad tecnológica significativa, pero pueden ser formados para ello. En su defecto, resulta relativamente fácil encontrar personal local suficientemente cualificado si fuese necesario contratar

Indiferente

El prestador cuenta con una amplia plantilla de operadores altamente cualificados y no supondría ningún problema contratar a alguien más si fuera necesario

Atributos de las tecnologías y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías el aspecto principal a conocer será la complejidad de operación y mantenimiento de las distintas líneas de tratamiento. En general, las tecnologías intensivas resultan más complejas que las extensivas, por la mayor presencia de equipos electromecánicos y por el mayor control que requieren los procesos de tratamiento. La siguiente tabla clasifica algunas líneas de tratamiento en base a su complejidad en operación y mantenimiento.

Tabla 15. Clasificación de diferentes líneas de tratamiento en función de la complejidad de operación y mantenimiento (MMAyA, 2021)

Complejidad	Líneas de tratamiento
Muy baja	LAG / HUM _h / FAFA
Baja	HUM _v / LOMB
Media	RAFA+LAG / FP / CBR / RAFA+FP / RAFA+CBR
Alta	AE



Figura 16. PTAR de Toledo, España

6.3.2 Accesibilidad a equipos de repuesto y a mantenimiento especializado

Los requerimientos en este sentido dependerán del nivel de equipamiento electromecánico de la tecnología. En general las tecnologías intensivas tienen mayor equipamiento por lo que demandan más este tipo de servicio, que repercutirá en los costos de explotación. Algunas tecnologías pueden emplear equipos que no es posible encontrar en la región o, incluso, en el país, siendo necesario enviar los equipos al extranjero para su reparación en caso de avería o teniéndose que importar las piezas o los equipos enteros para reparaciones y sustituciones. En otras ocasiones se trata de procesos patentados donde se requiere el servicio de la casa suministradora con cierta frecuencia para realizar ajustes y optimizar los procesos. Todos estos condicionantes pueden derivar en importantes problemas en la gestión de las instalaciones, con paradas prolongadas del funcionamiento de diferentes procesos o de la línea completa.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer si es viable y asequible económicamente disponer tanto de repuestos como del servicio técnico para los equipos críticos de las diferentes tecnologías analizadas. A continuación, se analizan una serie de situaciones posibles respecto a este factor.

Tabla 16. Análisis de situaciones donde se valora el factor “disponibilidad de repuestos y servicio técnico”

Muy importante

De modo general no hay disponibilidad de servicios técnicos de revisión y reparación de elementos críticos de los equipos electromecánicos de alguna de las alternativas en el país. Por lo que una avería conllevaría un grave trastorno e incluso la parada de la instalación por un tiempo amplio.

Importante

Aunque hay disponibilidad de servicio técnico de revisión y reparación de los elementos críticos de los equipos electromecánicos de PTAR en el país, el costo bien del servicio o bien de los repuestos resulta demasiado elevado para las capacidades del operador o los servicios necesarios se encuentran en otra región, con lo que las posibles reparaciones se dilatarán en el tiempo de manera significativa.

Influye en la decisión

Hay disponibilidad de servicio técnico de revisión y reparación para la totalidad de los elementos de los equipos electromecánicos de PTAR en el país. El costo, tanto del servicio como de los repuestos, aunque gravoso, resulta asumible para las capacidades del operador.

Indiferente

Hay disponibilidad de servicio técnico de revisión y reparación para la totalidad de los elementos de los equipos electromecánicos de PTAR en el país. El costo, tanto del servicio como de los repuestos, resulta relativamente asequible para las capacidades del operador.

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías el aspecto principal a conocer serán los equipos críticos a este respecto que tienen las tecnologías de las líneas de tratamiento analizadas.

La siguiente tabla clasifica algunas líneas de tratamiento en base a la disponibilidad de repuestos y servicio técnico.

Tabla 17. Clasificación de diferentes líneas de tratamiento en función de la disponibilidad de repuestos y servicio técnico (elaboración propia).

Problemática potencial de disponibilidad de repuestos y servicio técnico	Líneas de tratamiento
Baja	LAG / HUMh / FAFA
Media	HUMv / LOMB / RAFA+LAG / FP / RAFA+FP
Alta	AE/ CBR / RAFA+CBR

En general los tratamientos de carácter extensivo sin requerimientos de bombeos son los que menos repuestos necesitan y sus equipos son sencillos y de fácil reparación a nivel local (compuertas, rejillas, válvulas, chapas deflectoras, etc.). No precisan, por tanto, de un servicio técnico externo permanente.

Los mayores problemas se podrían dar en tratamientos intensivos como los CBR y lodos activados. En el primero de los casos, todos los componentes que forman los rotores deben importarse en caso de avería. En lodos activados, es necesario asegurarse de que se cuenta en el país con un adecuado servicio técnico postventa de los equipos más singulares (elementos de control del proceso, difusores, compresores, etc.), pues puede resultar un tema muy problemático posteriormente. Incluso algunos de estos sistemas dependen de equipos y software de programación que están patentados por las casas suministradoras, como sucede con los sistemas secuenciales (SBR) o los reactores biológicos de membranas (MBR), por ejemplo.

Hay otros intensivos, sin embargo, que cuentan con equipos más sencillos que pueden ser mantenidos sin problemas, como serían los filtros percoladores.

6.4 SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA

Los aspectos económicos, como en cualquier proyecto, van a ser siempre muy importantes. No obstante, es necesario realizar un análisis para poder determinar cuáles de estos aspectos van a formar parte de la sostenibilidad económica del proyecto.

Como norma general en el tratamiento de aguas residuales, los costos de O&M van a tener una mayor relevancia que los de construcción. Por un lado, la amortización de la instalación por habitante y año suele representar un valor relativamente bajo frente a los gastos de operación y mantenimiento y, por otro, es bastante habitual que la inversión o parte de ella sea aportada por alguna entidad externa al beneficiario a fondo perdido, por lo que estos costos no se repercutirán sobre la sostenibilidad del servicio.

La sostenibilidad económica irá asociada al costo del servicio que se debe asumir por el prestador y las diferentes componentes que se consideren para su determinación van a depender del contexto y los objetivos del proyecto. El costo del servicio incluirá en la práctica totalidad de los casos la operación y mantenimiento de las instalaciones. Sin embargo, costos de otra naturaleza, como los de construcción o los de reposición no siempre repercutirán en su totalidad en la sostenibilidad económica, ya que una entidad externa (una administración regional o estatal o una agencia de cooperación, por ejemplo) podría hacerse cargo de ellos.

Como se ha visto en el apartado 5.5.2, hay muchos aspectos que van a condicionar los costos, tanto de construcción como de operación y mantenimiento y también hay otros aspectos de otros ámbitos que también condicionarán la sostenibilidad económica. Por todo ello la valoración económica debería estructurarse en cada caso teniendo en cuenta las circunstancias locales.

En cuanto al alcance de los costos a considerar para evaluar la sostenibilidad es importante tener en cuenta que, en muchas ocasiones, a los costos asociados a la PTAR se le deberán sumar los de las obras complementarias (camino de acceso y emisario a la planta, por ejemplo), la red de saneamiento y bombeos asociados a cada alternativa.

La incidencia de la economía de escala

En el caso del tratamiento de aguas residuales, tanto los costos de construcción de las instalaciones como los de operación y mantenimiento están muy condicionados por la economía de escala. Por tanto, los costos per cápita se verán muy incrementados en las pequeñas poblaciones, las cuales suelen tener además menores recursos económicos que las grandes ciudades, lo que convierte estos factores en determinantes para su sostenibilidad. No solo las plantas de tratamiento, también las redes de saneamiento es habitual que resulten más costosas por el mayor grado de dispersión de la población.

Los costos relativos pueden incrementarse de tal manera que, por debajo de cierto tamaño, resulta particularmente difícil abordar tanto la construcción como la operación y mantenimiento de las PTAR. Es habitual que las pequeñas poblaciones cuenten con una fuente de financiación para poder construir la planta de tratamiento o incluso que los costos de construcción sean asumidos por un estamento superior. Sin embargo, los costos y la complejidad de la operación pueden hacer insostenible el mantenimiento de las infraestructuras.

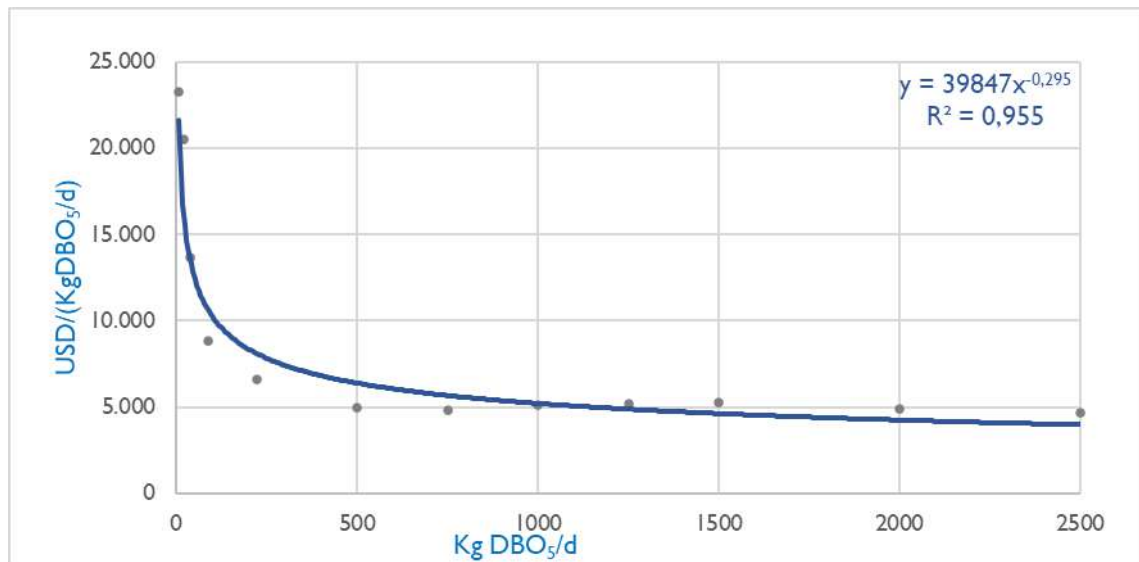


Figura 17. Curva teórica de implantación de la línea de tratamiento basada en filtro percolador en El Salvador (AECID, 2021b)

Por tanto, en las pequeñas poblaciones resulta especialmente importante resolver el problema de la sostenibilidad técnica y económica y ello pasa tanto por el empleo de tecnologías adecuadas (de bajo costo de explotación y sencillas de operar), como por la implantación de modelos de gestión apropiados para estas poblaciones (modelos de gestión supramunicipal que permitan compartir los medios disponibles y reducir el costo por habitante).

Costos de reposición

Por otra parte, aunque las obras no sean financiadas por el beneficiario, si en el futuro la propia población debe costear la ampliación y remodelación de las instalaciones, debería tener en cuenta también este factor en su análisis de la sostenibilidad económica. Llegado el momento, la población debería contar, al menos, con capacidad financiera para acometer estas obras. Además, es conveniente prever que no toda la instalación llega al año previsto de vida útil y colapsa de golpe, sino que a lo largo de los años de funcionamiento de las instalaciones es probable que determinados elementos se vayan deteriorando y sea necesario reponerlos. Generalmente la obra civil va a tener una mayor vida útil que los equipos electromecánicos y en ambos casos, pero sobre todo en el caso de los equipos, la vida útil y por tanto la necesidad de reposición va a estar completamente condicionada por un mantenimiento adecuado de las instalaciones. Si no se prevén adecuadamente los aportes requeridos para este mantenimiento, muy probablemente será más costoso en términos de reposición de activos, que además, si no se han previsto, no siempre va a ser posible asumirlos cuando se presentan. Los costos referentes a la reposición es habitual calcularlos como un porcentaje anual del costo de construcción, diferenciando entre obra civil y equipos electromecánicos.

A continuación se analizan los dos factores que resultan más paradigmáticos en cuanto a sostenibilidad económica, los costos de construcción y los costos de operación y mantenimiento.

6.4.1 Costos de construcción

Serán los costos de ejecución de las obras necesarias, incluidos los costos financieros asociados que existan y los costos derivados de la adquisición de terrenos.

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer todos los aspectos que pueden condicionar el costo de ejecución de las obras y que se han visto en apartados anteriores, como son:

- Las características del agua bruta, límites de vertido y variables ambientales que condicionan el dimensionamiento de las instalaciones
- Costo de adquisición de los terrenos
- Topografía del terreno
- Inundabilidad de la parcela
- Características geotécnicas y nivel freático del terreno
- Precios unitarios de partidas de obra y de equipos electromecánicos más importantes en la construcción de PTAR

Importancia del factor

También desde la perspectiva local, debe analizarse el papel que juegan los costes de construcción en la decisión de la alternativa. La importancia del factor en la decisión vendrá muy condicionada por el origen de los fondos y la disponibilidad presupuestaria para la construcción de la PTAR. Cuando los costos de inversión no son sufragados por el beneficiario de la instalación, este criterio junto todos los factores que lo condicionan debería estudiarse separadamente de la sostenibilidad económica. Si bien, en muchos casos hay situaciones mixtas en las que los beneficiarios asumen una parte o porcentaje del costo o, al menos, el costo del terreno.

La parte imputable al beneficiario sí debería incluirse en la sostenibilidad económica, ya que irá interiorizada en la tarifa y por tanto en el costo del servicio. En estos casos es habitual anualizarla y considerarla junto a otros costos como los de operación y mantenimiento o de reposición de activos.

La parte aportada por un promotor externo a fondo perdido debería analizarse separadamente y en este caso, su importancia en la decisión podrá venir condicionada por factores externos al proyecto específico y por factores internos:

- La importancia por factores externos sería impuesta por el financiador del proyecto en la medida en que considere que un ahorro en la ejecución de las obras es importante para él. En ocasiones hay programas amplios en los que se incluye la construcción de varias PTAR, por lo que el ahorro que se pueda lograr en una actuación concreta liberará fondos para las otras actuaciones, por tanto, para el financiador, tendrá un costo de oportunidad importante. Puesto que es quien financia, probablemente podrá imponer unilateralmente un peso importante en la decisión, si lo considera conveniente.
- Además, la disponibilidad presupuestaria puede tener carácter de factor limitante si existe un tope para la construcción de la planta de tratamiento.
- En ocasiones, el presupuesto total no es solo para la construcción de la PTAR, sino que contempla un desarrollo más amplio del saneamiento. Por tanto, no solo habrá un factor

limitante, sino también un costo de oportunidad a valorar, si lo que se destine a la planta, deja de emplearse, por ejemplo, en la construcción de las redes de saneamiento.

Si existe esta limitación presupuestaria, como se ha dicho, se debe tener en cuenta que el costo de los elementos complementarios de la instalación de tratamiento puede llegar a ser muy elevado, reduciendo así la disponibilidad presupuestaria para la PTAR. El costo del emisario que lleva las aguas hasta a la PTAR, con los bombeos que necesite, el costo de la conexión de agua y electricidad y del camino de acceso hasta la propiedad donde se ubica la planta, son partidas que han de contemplarse en casi todas las instalaciones. Si estas actuaciones presentan complicaciones y si, además, se requiere de protección contra inundaciones y/o de tanques de laminación, los sobrecostos pueden ser muy importantes. Como ejemplo de ello se puede señalar que los estudios realizados para la Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Bolivia estimaron que, como término medio, estas obras complementarias superaban el 20% del costo de la PTAR, siendo este porcentaje más importante cuanto más pequeña era la instalación. Estas circunstancias muchas veces no son consideradas con su debida importancia en las estimaciones de presupuesto, ni en la identificación del proyecto ni en las fases iniciales de estudio de alternativas del proyecto, repercutiendo posteriormente en reducciones de alcance en la solución propuesta. En algunos casos, de haberse tenido en cuenta este aspecto en el estudio de alternativas, la solución elegida probablemente hubiera sido diferente.

A continuación, se muestra un análisis de la importancia que puede presentar el factor de “costos de construcción” en diferentes situaciones.

Tabla 18. Análisis de situaciones donde se valora el factor de “costos de construcción”

Muy importante

Existe la necesidad de reducir el monto de la inversión en la medida de lo posible, bien porque la mayoría de la inversión se financiará vía tarifas y hay limitaciones claras al respecto, o bien porque el costo de oportunidad de los fondos asignados para el proyecto es muy elevado.

Importante

Existe el deseo por parte de la entidad promotora del proyecto de reducir el monto de la inversión en la medida de lo posible, bien porque una parte importante de la inversión se financiará vía tarifas, o bien porque el costo de oportunidad de los fondos asignados para el proyecto es elevado.

Influye en la decisión

No existen limitaciones presupuestarias significativas, bien porque la disposición presupuestaria es suficiente o bien porque se tiene prevista la financiación de la inversión vía tarifas resultando claramente viable incluso para tecnologías sofisticadas, intensivas en cuanto a costos de inversión. El costo de oportunidad de los fondos para el proyecto es medio.

Indiferente

No existen limitaciones presupuestarias porque la disposición presupuestaria es suficiente incluso para tecnologías sofisticadas, intensivas en cuanto a costos de inversión, por ejemplo, porque la gran mayoría de los fondos de la inversión proceden de un programa a fondo perdido y con asignación suficiente.

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías se debe conocer el costo de construcción de cada línea de tratamiento. Aunque en la bibliografía existen curvas de costos genéricas para diferentes tecnologías y líneas de tratamiento, se debe tener en cuenta que generalmente han sido desarrolladas para procesos de planificación, donde priman más los valores medios que los valores precisos de cada actuación, por lo que estas curvas tienen una aplicación muy limitada a la hora de evaluar alternativas en un caso concreto. En la publicación “*Metodologías para la Estimación de Costos de Tratamiento de Aguas Residuales en la Planificación Sectorial*” (AECID, 2021b) se encuentra una buena muestra de estas curvas y se explica cómo se elaboran y sus limitaciones. En esta publicación, aunque sea en términos generales, ya se puede ver las importantes variaciones de costos que puede haber entre tecnologías entre un país y otro, por lo que se desaconseja emplear estimaciones de otros países y lugares sin adaptarlo.

A pesar de estas limitaciones, y siempre que el terreno no presente problemas constructivos significativos para ninguna de las alternativas evaluadas, puede ser de utilidad disponer de unos valores de referencia comparativos si se dispone de ellos en guías o estudios especializados realizados en el mismo país. La siguiente figura muestra las curvas de costos de implantación tipo para líneas de tratamiento basadas en la tecnología de Aireación Extendida para cinco escenarios planteados en tres países distintos: Bolivia en sus tres zonas ecológicas predominantes, El Salvador y España. En ella se pueden observar las diferencias en costos existente de un contexto a otro.

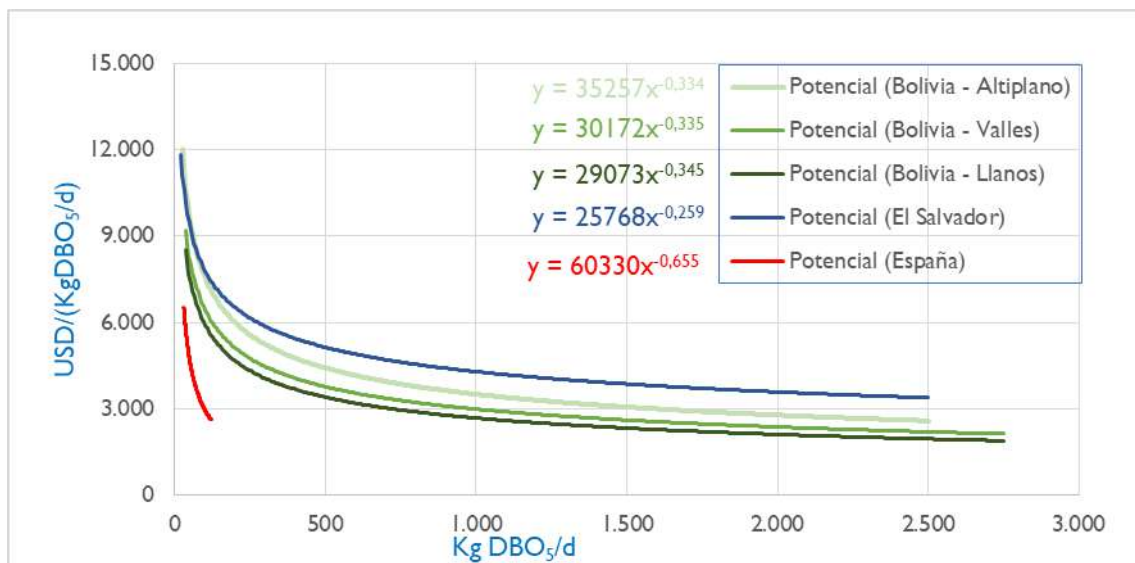


Figura 18 Comparativa de curvas de implantación tipo para líneas de tratamiento basadas en la tecnología de Aireación Extendida (AECID, 2021b)

En ocasiones estas curvas no se elaboran a partir de promedios de proyectos reales, sino que se trata de curvas teóricas desarrolladas a partir de diseños básicos de líneas de tratamiento. Aunque los costos variarían para cada caso concreto, es de esperar que las diferencias relativas se mantengan aproximadamente constantes y se puedan utilizar de referencia en procesos de selección de alternativas en zonas donde la temperatura y las bases de partida estén en el entorno a las consideradas en los diseños básicos.

Como ya se ha visto, las circunstancias locales tienen una importancia determinante en el costo de construcción. Las dimensiones de los diferentes elementos de proceso van a depender de las características de las aguas a tratar, de los límites de vertido y de las variables ambientales, entre otros. La presencia de terreno rocoso, nivel freático elevado, o pendientes inapropiadas son aspectos que como se ha visto pueden influir mucho y de manera diferenciada en cada tecnología, pero también el costo de adquisición del terreno o el precio unitario de las partidas de obra y de equipos electromecánicos más importantes. Si es necesario recrecer el terreno y protegerlo de las inundaciones, las dimensiones y las características de los elementos de la línea de tratamiento pueden determinar diferencias de costos muy importante.

Muchas obras complementarias, como el emisario hasta la PTAR, camino de acceso, emisario al vertido, por ejemplo, no van a depender de la alternativa que se considere. Pero en algunas situaciones sí puede haber esa dependencia de la opción tecnológica, siendo el caso más típico cuando se comparan alternativas que consumen o no energía eléctrica. En este caso el costo del enganche a la red solo será imputable a las opciones que consumen energía.

Todos estos condicionantes hacen muy difícil establecer una categorización genérica de los tratamientos en base al costo de implantación y es por lo que se recomienda la realización de prediseños adaptados a las circunstancias locales.

Independientemente de si se parte de una estimación de costos locales, de curvas de referencia o de cualquier otro sistema, se debe asegurar que los procedimientos con los que se obtienen los costos de tratamiento para todas alternativas son homogéneos y comparables y que, de existir circunstancias locales que influyen determinantemente en los costos, éstas se tomarán en cuenta en la estimación.

6.4.2 Costos de operación y mantenimiento

Los costos de O&M generalmente consideran solo los costos requeridos para el correcto funcionamiento de la PTAR, aunque para asegurar la sostenibilidad futura, se debería contemplar además el costo de reposición de activos.

Al igual que en la construcción, las circunstancias locales van a tener mucha incidencia sobre los costos de explotación. Además de las repercusiones sobre las dimensiones y funcionamiento de los procesos, también el precio de las diferentes puede variar mucho de un lugar a otro, como son: el costo de la mano de obra, de la energía y de los reactivos, la distancia al vertedero o al terreno agrícola donde se vaya a entregar el lodo y el costo del transporte, el costo del relleno sanitario, el costo de las analíticas o el costo de reparaciones y reposiciones de equipos y elementos singulares.

Importancia del factor

Al margen de por los aspectos comentados anteriormente, desde la perspectiva de las circunstancias locales también se deben analizar otros aspectos que condicionarán la sostenibilidad económica:

- El resto de los costos asociados al mantenimiento de los servicios de agua y saneamiento
- La capacidad económica y de gestión de la entidad operadora.
- La disponibilidad al pago de la población.
- La existencia o no de mecanismos tarifarios, u otros, para financiar la explotación del saneamiento y la PTAR.

En la tabla siguiente se muestra un análisis de diferentes situaciones donde el costo de operación y mantenimiento puede tener una importancia relativa distinta.

Tabla 19. Análisis de la importancia del factor de “costos de operación y mantenimiento”

Muy importante

Existe la necesidad de reducir los costos de operación y mantenimiento en la medida de lo posible porque hay serias dudas sobre la sostenibilidad económica del proyecto debido a las reducidas capacidades de la población y el prestador.

Importante

Se debe tratar de reducir los costos de operación y mantenimiento en la medida de lo posible porque el prestador no está muy capacitado y/o la disposición al pago por parte de la población es escasa.

Influye en la decisión

Aunque no existan limitaciones concretas, la entidad promotora del proyecto desea reducir los costos de operación y mantenimiento en la medida de lo posible.

Mínimo

En general, este factor nunca va a ser indiferente para la decisión, aunque en el caso de grandes prestadores pudiera haber otros factores que fueran más importantes.

Atributos y puntuación del factor

Desde la perspectiva de las tecnologías el aspecto principal a conocer será los costos de operación y mantenimiento de las líneas de tratamiento consideradas, muchos de los cuales van a depender de las dimensiones de la instalación y de los equipos de proceso, por lo que resulta muy deseable realizar el prediseño de las mismas. Las partidas necesarias para poder operar y mantener adecuadamente las instalaciones serán en esencia dependientes del tamaño de la instalación, destacando las siguientes:

- Necesidades de personal (trabajadores y horas/semana). Dependerá del grado de automatización y control de los diferentes procesos y de la instalación en sí.
- Consumo de energía. Dependerá de los bombeos que haya sido necesario introducir y del grado tecnológico de la instalación.
- Consumo de reactivos, en el caso de que se incluya, por ejemplo, eliminación de fósforo o desinfección.
- Producción y características de los lodos.
- Mantenimiento especializado y reparaciones de equipos y obra civil.
- Partidas necesarias para mantenimiento general de la instalación (jardinería, edificios, viales, etc.).
- Toma de muestras y analítica.

En general los costos de operación y mantenimiento van a venir condicionados por la complejidad de la instalación y la singularidad de los equipos y tecnologías empleados.

Las circunstancias locales pueden incidir en cierta medida las demandas de costos de cada alternativa e incluso pueden transformarlas. En los lugares donde la mano de obra no especializada tiene un costo reducido suele optarse por asumir más tareas de forma manual que en las zonas donde la mano de obra es muy cara. La partida que más puede variar su demanda dependiendo de las condiciones locales es el consumo energético en los procesos que requieren aireación. Por ello, también para la estimación de los costos de O&M resulta muy recomendable realizar previamente un prediseño.

En las guías especializadas se pueden encontrar estimaciones tabuladas de estas partidas para distintas alternativas en función del tamaño de la instalación. También se pueden encontrar estimaciones de

costos totales, si bien la aplicación en estos casos estará muy limitada solo para aquellas plantas en las que las circunstancias y los precios locales sean muy similares a las que se emplearon en el estudio de determinación de esas curvas.

Las diferencias en costos de operación y mantenimiento entre líneas de tratamiento llegan a ser muy significativas y la elección de una línea u otra puede condicionar de un modo muy importante la sostenibilidad del servicio. Los costos en los tratamientos intensivos son mayores que en tratamientos extensivos, principalmente por los requerimientos energéticos. Con fines exclusivamente ilustrativos, se reproduce una tabla de la guía boliviana (MMAyA, 2021), donde se muestran las líneas de tratamiento propuestas y su costo de operación y mantenimiento en dólares por habitante para diversos tamaños de población y para dos tipos de contextos climatológicos. Dentro de los tratamientos intensivos, los lodos activos (AE-aireación extendida en la tabla ejemplo) cuentan con los costos más acusados por la aireación tan intensa que requiere y mucho mayor todavía en zonas de altiplano, ya que la altitud reduce la solubilidad de oxígeno en el agua de un modo muy notorio. Debido a lo expuesto en zonas de altitud elevada se debería tratar de evitar en la medida de lo posible la utilización de tecnologías basadas en lodos activados, como sería el caso de la aireación extendida. Se puede consultar más información sobre el detalle de los diseños considerados para el cálculo de estos costos en la referencia correspondiente.

Tabla 20. Estimación de la costo de operación y mantenimiento (USD/hab) para las líneas de tratamiento consideradas (MMAyA, 2021)

Línea	Clima	Población (habitantes)					
		1.000	2.000	5.000	10.000	25.000	50.000
FAFA	Tropical	72	40	-	-	-	-
RAFA+LAG	Tropical	88	46	24	19	15	11
LAG	Altiplano	73	39	20	12	12	11
	Tropical	71	37	17	10	10	8
HUMh	Altiplano	70	37	19	-	-	-
	Tropical	70	37	18	-	-	-
HUMv	Altiplano	70	37	18	-	-	-
	Tropical	70	36	18	-	-	-
LOMB	Altiplano	89	53	33	-	-	-
	Tropical	93	57	36	-	-	-
FP	Altiplano	104	58	32	28	23	20
RAFA+FP	Tropical	100	54	29	24	19	15
CBR	Altiplano	121	76	49	45	34	31
RAFA+CBR	Tropical	106	63	38	34	28	23
AE	Altiplano	155	108	97	86	83	86
	Tropical	137	84	67	49	45	42

Como se ha mencionado, hay factores que tienen un nivel de incertidumbre muy elevado debido a las oscilaciones del precio de la energía, como son el consumo energético de la instalación y el transporte de lodos, por lo que podrían analizarse como factores separados dentro de la evaluación de costos, recibiendo una importancia algo superior a lo que le correspondería por estimación de costos actuales.

6.5 SOSTENIBILIDAD SOCIAL

Aunque el proyecto consistiese únicamente en la ejecución de la PTAR y no afectase al resto del saneamiento, resulta muy conveniente realizar un proceso de participación pública. Con la participación pública se obtiene un mejor conocimiento de la problemática existente, se adquiere un mayor compromiso de las partes interesadas, se dota al proceso de mayor transparencia, se contribuye a la resolución de conflictos y se genera una mayor concientización del mantenimiento del servicio.

En ocasiones la población o el operador son contrarios a la instalación de una determinada tecnología por sus malas experiencias en el pasado. Es habitual que estas malas experiencias están basadas en proyectos deficientes, bien por fallos en la determinación de las bases de partida, en los diseños o en la construcción, que llevaron a la denostación de una determinada tecnología. Son todos errores evitables, que con una buena gestión del proyecto no tienen por qué volverse a repetir. No obstante, aunque estas posiciones puedan no estar justificadas desde una perspectiva racional, no por ello hay que descartarlas ni mucho menos. Es más, en algunas ocasiones son factores muy decisivos en un proyecto, pudiendo la resistencia de estos grupos de interés llevar al fracaso del proyecto. En estos casos podría convenir incluso considerar la aceptación de los grupos de interés como factor limitante.

6.5.1 Aceptación por parte de la población

La población a la que dará servicio al PTAR debe conocer el proyecto y las alternativas que se están planteando, con el fin de que esté informado y pueda sensibilizarse y concienciarse de la necesidad de dichas infraestructuras y los problemas que derivan del contexto del proyecto y de los objetivos y riesgos del mismo. En este proceso de participación pública, la población debe tener la posibilidad de manifestar su opinión y sus intereses y es posible que en este sentido la selección de la línea de tratamiento sea una inquietud.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer si existe una percepción social negativa con respecto a alguna tecnología de tratamiento y el detalle de las experiencias que han originado este posicionamiento en contra. También sería interesante conocer la sensibilidad de la población con respecto a los impactos que pueda causar el efluente de la PTAR una vez se construya, tanto en el ecosistema del medio receptor como en los usos del agua aguas abajo.

En ocasiones existe una oposición social muy fuerte a las lagunas de estabilización por los perjuicios asociados a olores en el pasado. Esto no tiene nada que ver con la tecnología, pues unas lagunas bien diseñadas y operadas no tienen por qué generar impactos significativos en este aspecto, pero la realidad es que o un mal diseño, o una deficiente operación o sobrecargas recurrentes no previstas en el proyecto originada por descarga industrial o de otro tipo acabaron minando la paciencia de la población. En otras ocasiones se produce un rechazo de la población local a la ubicación del punto de descarga en determinados cursos por lo que le pueda afectar a sus intereses.

En la tabla siguiente se identifican situaciones en las que sería diferente la importancia de este factor.

Tabla 21. Análisis de la importancia del factor de “aceptación por parte de la población”

Muy importante

Se trata de una población sumamente crítica y participativa en los proyectos comunitarios y/o existen antecedentes en cuanto a experiencias muy insatisfactorias en agua y saneamiento.

Importante

Población muy participativa y comprometida con el proyecto y cuenta con experiencias poco satisfactorias

Influye en la decisión

Existen experiencias poco satisfactorias sobre diferentes tecnologías en el lugar o en poblaciones cercanas

Indiferente

Se trata de una población poco crítica y muy raramente implicada en los proyectos comunitarios y no existen antecedentes en cuanto a experiencias insatisfactorias en agua y saneamiento

Atributos y puntuación del factor

Desde la perspectiva de las tecnologías a priori no se pueden dar recomendaciones específicas, pues dependerá de cada caso concreto. Habrá tecnologías sobre las que la población tendrá una muy mala percepción debido a las malas experiencias del pasado o incluso porque hayan supuesto un problema muy importante en alguna población cercana y el resto seguramente resulten indiferentes.

Al respecto habrá que tener en cuenta principalmente las molestias potenciales que una tecnología puede causar sobre la población que en el futuro pueden complicar la sostenibilidad social y que se expondrán en el apartado siguiente.

6.5.2 Impactos potenciales sobre la población y actividades económicas

Las diferentes líneas de tratamiento pueden generar una serie de molestias sobre la población cercana, como puede ser la generación de ruidos u olores. Nuevamente la selección del terreno donde se ubique la PTAR va a condicionar la gravedad de muchos de los impactos que se puedan generar, al condicionar la cercanía de la población y de actividades sensibles (instalaciones turísticas, hospitalarias, educativas, etc.)

6.5.2.1 Riesgo de afección por olores

Uno de los principales impactos ambientales asociados a las PTAR, y motivo de frecuentes quejas por parte de la población, es la generación de olores desagradables. Los olores se generan debido a condiciones de anaerobiosis por compuestos como sulfuros y mercaptanos.

Aunque en ocasiones se deben a procesos que no funcionan adecuadamente, en muchas ocasiones se generan problemas de olores porque el agua llega en condiciones sépticas, propiciado por la configuración de la red de saneamiento, por lo que es un tema que podría trascender a la línea de tratamiento considerada.

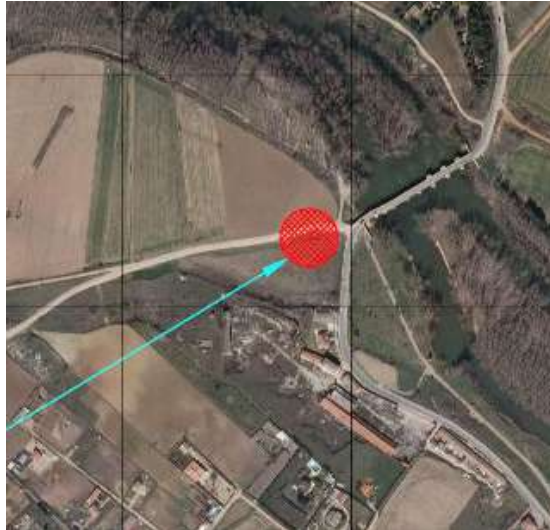


Figura 19 Terreno de ubicación de una PTAR próxima a zonas habitadas

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer la ubicación de los asentamientos de población más cercanos a la PTAR, conocer si son asentamientos legales o no y otros aspectos que pueden ser decisivos en la propagación de olores como son la intensidad y dirección de los vientos predominantes.

A continuación, se analizan diferentes situaciones donde puede cambiar la importancia del factor “riesgo de generación de olores”.

Tabla 22. Análisis de situaciones donde se valora el factor de “riesgo de afección por olores”

Muy importante

Terrenos con asentamientos urbanos y/o turísticos consolidados o planificados dentro del horizonte del proyecto a una distancia menor a 250 metros, o menores de 500 metros si están en la dirección de los vientos predominantes en la zona.

Importante

Terrenos con asentamientos urbanos consolidados o planificados dentro del horizonte del proyecto a una distancia menor a 500 metros.

Terrenos reducidos con asentamientos urbanos ilegales a una distancia menor a 250 metros.

Influye en la decisión

Terrenos con asentamientos urbanos u otras actividades lo suficientemente cercanos como para que las actividades de la EDAR supongan para los mismos un perjuicio significativo en lo que a olores se refiere.

Indiferente

Terrenos suficientemente alejados de asentamientos urbanos o de otras actividades, de modo que el riesgo de perjuicio asociado a la generación de olores es muy reducido.

Asimismo, es necesario conocer la configuración de la red de saneamiento y los aportes a la red de saneamiento de vertidos industriales, si pueden incidir en un aumento del riesgo de olores. Son situaciones especialmente problemáticas si la red cuenta con impulsiones o conducciones en carga donde el agua esté un importante tiempo de retención, si las temperaturas pueden ser elevadas y si existen vertidos a la red de materia orgánica, aguas de elevada temperatura y aporte de sulfatos (entradas de agua de mar, entre ellos).

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías el aspecto principal a conocer será el riesgo de emisión de malos olores de las distintas líneas de tratamiento y si se dispone en ellas conocer las tecnologías para su abatimiento que se han considerado.

En la tabla siguiente se ordenan las tecnologías de tratamiento consideradas en función del riesgo asociado a la emisión de malos olores.

Tabla 23. Riesgo de producción de olores para las líneas de tratamiento consideradas (MMAyA, 2021)

Riesgo de emisión de malos olores	Línea de tratamiento
Alto	FAFA / RAFA+LAG / RAFA+FP / RAFA+CBR / LAG
Medio	CBR / FP / HUMh / HUMv / LOMB
Bajo	AE

Los sistemas de tratamiento aerobios presentan un menor riesgo de generación de olores desagradables que los sistemas anaerobios, siempre y cuando estén bien operados. De hecho, la generación de malos olores en sistemas aerobios suele ser un claro indicador de la existencia de algún fallo, o problema, en la operación de las instalaciones de tratamiento. En el caso de procesos anaerobios, como los RAFA, FAFA o lagunas anaerobias el riesgo de producción de olores es mucho mayor porque los procesos biológicos en condiciones de anaerobiosis producen sulfuro y mercaptanos.

En determinados casos, si este factor es crítico por la proximidad a zonas habitadas, se hace necesaria la cubrición de las unidades de tratamiento o de la totalidad de la PTAR, siendo más fácil la aplicación de sistemas de desodorización en estaciones compactas y de tamaño reducido. No obstante, hay experiencias de sistemas de lagunas de estabilización en poblaciones de gran tamaño, en los que se han cubierto las lagunas anaerobias y se han quemado los gases recogidos.



Figura 20 Lagunas anaerobias cubiertas (Santa Cruz, Bolivia)

Uno de los puntos más problemáticos con respecto a la generación de olores en la PTAR es el pretratamiento, principalmente por la llegada del agua residual y la acumulación de los residuos que retiran del agua residual en su tratamiento, como arenas o detritus, lo que en determinadas circunstancias puede requerir su cubrimiento.

En caso de ser necesaria la cubrición de determinados elementos de proceso, deberían ser tenidas en cuenta en la estimación de costos de las diferentes alternativas.

6.5.2.2 Riesgo de afección por ruidos

La generación de ruidos en las PTAR está asociada principalmente al funcionamiento de equipos electromecánicos (bombas, soplantes, etc.), por lo que las tecnologías que no precisan de estos equipos para su funcionamiento presentan un impacto muy reducido en este aspecto. Igualmente, es posible minimizar la generación de ruidos en los equipos mencionados con medidas correctoras para mitigarlos, principalmente mediante el aislamiento acústico en los espacios confinados que albergan estos equipos.

Este factor puede ser importante cuando una PTAR problemática en este aspecto se va a construir muy próxima a una población, o en determinados entornos naturales con especies sensibles al ruido.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer la ubicación de los asentamientos de población más cercanos a la PTAR, conocer si son asentamientos legales o no y la superficie disponible, pues en el caso de ser una gran superficie se puede tratar de construir la PTAR en la zona que menos impacto cause.

En el caso de que la PTAR se encuentre en una zona medioambientalmente sensible sería necesario también conocer si hay especies que presentan una especial sensibilidad al ruido.

A continuación, se muestra un análisis de la importancia que puede adquirir este factor.

Tabla 24. Análisis de situaciones donde se valora el factor de “riesgo de afección por ruidos”

Muy importante

Terrenos reducidos con asentamientos urbanos consolidados o planificados dentro del horizonte del proyecto a una distancia menor a 100 metros.

Importante

Terrenos con asentamientos urbanos consolidados o planificados dentro del horizonte del proyecto a una distancia menor de 100 metros, pero suficientemente amplios de modo que cuenten con versatilidad en cuanto a ubicar los elementos ruidosos en zonas de menos impacto.

Influye en la decisión

Terrenos con asentamientos urbanos o de otro tipo lo suficientemente cercanos como para que las actividades de la PTAR supongan para los mismos un perjuicio significativo en lo que a ruidos se refiere

Indiferente

Terrenos suficientemente alejados de asentamientos urbanos o de otro tipo, de modo que el riesgo de perjuicio asociado a la producción de ruidos es muy reducido

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías el aspecto principal a conocer es el riesgo de emisión de ruidos de las distintas líneas de tratamiento a considerar.

A continuación, se clasifican las tecnologías en función del riesgo asociado a la emisión de ruidos, sin considerarse medidas correctoras para mitigar los ruidos.

Tabla 25. Riesgo de emisión de ruidos para las líneas de tratamiento consideradas (MMAyA, 2021)

Riesgo de emisión de ruidos	Línea de tratamiento
Alto	AE
Medio	CBR / FP / RAFA+CBR / RAFA+FP / LOMB
Bajo	FAFA I / RAFA+LAG / HUMv ¹ / HUMh / LAG

Como se ha comentado, se puede observar que en los tratamientos intensivos el riesgo es mayor que en los extensivos por la presencia de equipos electromecánicos. En concreto en los procesos de lodos activados la emisión de ruidos será mayor debido a las soplantes del tratamiento biológico que son equipos especialmente problemáticos a este respecto.

6.5.2.3 Impacto visual

El problema del impacto visual puede presentarse en las pequeñas poblaciones ubicadas en zonas rurales, zonas con un alto valor ecológico o enclaves turísticos, zonas en las que es conveniente cuidar el paisaje. En especial cuando se trata de zonas con una elevada calidad paisajística, se debe procurar implantar soluciones que presenten un bajo impacto visual.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer si el terreno de la PTAR será próximo a zonas turísticas o zonas con un importante valor ecológico o paisajístico.

A continuación, se muestra una propuesta situaciones donde puede cambiar la importancia del factor “impacto visual”.

Tabla 26. Análisis de situaciones donde se valora el factor de “impacto visual”

<p>Muy importante Terrenos ubicados a escasa distancia de enclaves turísticos en las que el impacto económico indirecto debido a la afección visual resultaría muy importante. Terrenos ubicados en áreas que cuenten con un valor ambiental muy importante.</p>
<p>Importante Terrenos ubicados a una distancia de enclaves turísticos o de otra naturaleza tales que el impacto debido a la afección visual resulte significativo. Terrenos ubicados en áreas que cuenten con un valor ambiental importante</p>
<p>Influye en la decisión Terrenos ubicados a una distancia tal de asentamientos urbanos o de otra naturaleza tales que el impacto visual podría resultar significativo.</p>
<p>Indiferente Terrenos alejados de asentamientos urbanos o de otra naturaleza, de modo que el impacto visual no resultaría relevante.</p>

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías el aspecto principal a conocer será el grado de integración paisajística de las distintas líneas de tratamiento. La tabla siguiente clasifica las líneas de tratamiento consideradas en función de su potencial impacto visual.

Tabla 27. Grado de integración ambiental de las líneas de tratamiento consideradas (MMAyA, 2021)

Grado de integración paisajística	Línea de tratamiento
Buena	LAG / HUMh / HUMv / LOMB ¹
Moderada	AE / CBR / RAFA+CBR ² / FAFA / RAFA+LAG ²
Complicada	FP / RAFA+FP

¹Si los Lombrifiltros van cubiertos, su grado de integración es moderado.

²Se supone que los RAFA se disponen enterrados.

Algunas tecnologías extensivas, como los humedales y los lagunajes presentan un importante potencial de integración paisajística, mientras que las tecnologías intensivas en general se integran peor en los

entornos naturales. No obstante, en este último caso se pueden tomar medidas correctoras para minimizar el impacto visual de las instalaciones (cubrición en armonía con el entorno de la EDAR, etc.), siendo los filtros percoladores los más difíciles de mimetizar con el paisaje debido a su elevada altura.



Figura 21 PTAR con elevado impacto visual

6.5.3 Aceptación por parte del prestador del servicio

Un factor que a veces se pasa por alto en los procesos de selección de alternativas es la opinión y las necesidades del que será el operador de la PTAR. Las necesidades del operador pueden tomar la forma de limitaciones en los costos o en la capacidad de su personal para gestionar determinados sistemas, lo que en principio se evaluaría otros factores, pero también en preferencias basadas en su propia experiencia o preocupaciones por usar tecnologías que considere que no están suficientemente probadas. Estos aspectos pueden ser especialmente importantes en pequeñas comunidades, con escasa experiencia en operación de tratamientos innovadores.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer si el prestador ha tenido malas experiencias, en esta población o en otra en la que opera, con alguna tecnología, los motivos de esas malas experiencias y su percepción al respecto en la actualidad. Además, es muy importante que se valoren las opiniones de los responsables de la operación de la PTAR, atendiendo a la reticencia que pueda tener por determinadas tecnologías para tenerlo en cuenta en el proceso de valoración. Como se ha comentado, en casos extremos en que la entidad muestre rechazo por determinadas tecnologías este factor incluso podría llegar a ser limitante y provocar la exclusión de estas tecnologías del estudio.

Se debe destacar que en muchas ocasiones los prejuicios derivados de experiencias pasadas se deben a problemas que sucedieron por circunstancias locales (mal diseño o construcción de las instalaciones, sobresaturación, etc.) y que, trabajando con los operadores, si son buenos profesionales, estos prejuicios se pueden, al menos, laminar.

A continuación, se analizan diferentes situaciones en las que el factor “aceptación por parte del prestador” podría tener importancia en la decisión.

Tabla 28. Análisis de situaciones donde se valora el factor de “aceptación por parte del prestador”

Muy importante

Se cuenta con una entidad operadora muy implicada en sus competencias y que ha tenido experiencias muy negativas con alguna tecnología

Importante

Los técnicos de la empresa prestadora no tienen confianza en el funcionamiento de alguna tecnología de las alternativas propuestas.

O, por el contrario, tienen experiencias muy positivas y conocimiento del funcionamiento de una serie de tecnologías que son la que preferirían.

Influye en la decisión

Se han tenido malas experiencias respecto a problemas en la operación, por lo que el prestador tendría preferencia por otras.

Indiferente

No existe ningún prejuicio ni preferencia

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías no hay ningún aspecto específico que sea necesario estudiar. En cuanto a valoración de tecnologías no se pueden dar recomendaciones pues dependerá de cada caso concreto, habrá tecnologías con las que la entidad operadora tenga malas experiencias, otras por las que por cualquier motivo tendrá preferencia y otras por las que mostrarán cierta indiferencia. Lo que sí debería tratarse de lograr que estas preferencias se soporten en hechos y cuestiones concretas.

6.6 SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

Al margen de la afección medioambiental del propio vertido, que quedará acotada por la normativa aplicable, considerada en el factor “calidad requerida del efluente” y de las posibles afecciones a la población, integradas en el criterio de “sostenibilidad social”, una PTAR puede generar otras afecciones ambientales que será importante atender.

Como para cualquier otra actividad económica, aspectos como la emisión de gases de efecto invernadero o los asociados a la energía consumida y a las fuentes de energía resultan cada vez más relevantes. Asimismo, tratar de aprovechar los residuos generados transformándolos en subproductos útiles, la denominada economía circular, se va imponiendo como una responsabilidad ineludible. A este respecto la recuperación de energía, la valorización de los lodos, el reúso del agua o incluso recuperación de nutrientes resultan importantes en el ámbito de una PTAR.

Aunque la consideración de unos factores u otros en la selección de alternativas, así como su agregación, dependerá del contexto, en este apartado se exponen cuatro factores que pueden resultar representativos de la sostenibilidad ambiental, que son la emisión de gases de efecto invernadero, el balance energético, el reúso del agua o la valorización de lodos.

Al respecto es importante comentar que hay proyectos donde tanto la disposición de lodos en agricultura como el reúso de aguas son objetivos ya incluidos en el mismo y su posibilidad no será objeto de valoración, puesto que se tratará de una cuestión obligada. Sin embargo, en otros, estos aspectos pueden presentarse como una opción de mejora, por lo que sí se podrán considerar como factores de valoración.

6.6.1 Emisión de gases de efecto invernadero

Además de la generación indirecta de CO₂ por el consumo energético, las instalaciones de tratamiento, así como los sistemas de saneamiento, pueden generar de forma directa otros gases de efecto invernadero (GEI). Entre los GEI relevantes a efectos de las actividades que se llevan a cabo en una PTAR se encuentran el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (NO₂).

Para poder cuantificar las emisiones de GEI derivadas de una actividad previamente es requerido definir el alcance que se va a considerar. De acuerdo con “The Greenhouse Gas Protocol” (WBCSD & WRI, 2004), se define Alcance 1 como las emisiones de GEI directas, es decir, las que ocurren de fuentes controladas desde la misma actividad. El Alcance 2 incluye las emisiones de GEI indirectas de la electricidad adquirida para llevar a cabo la actividad concreta. El Alcance 3 incluye el resto de emisiones indirectas asociadas a la actividad, pero fuera de su control, es decir las referentes al ciclo de vida de consumibles y otros productos que se utilicen en el ámbito de la actividad en la PTAR. Teniendo en cuenta que el dióxido de carbono generado en procesos de tratamiento de aguas residuales se considera emisión biogénica y, por tanto, no computa como GEI y teniendo en consideración los alcances 1 y 2, que son los habituales en este tipo de análisis, las emisiones de GEI más relevantes en una PTAR serían:

- Las emisiones directas de CH₄ que se producen principalmente en procesos anaerobios, cuando el biogás no es quemado o aprovechado.
- Las emisiones directas de NO₂ producidas en procesos metabólicos que suceden tanto en la nitrificación-desnitrificación como en la descarga del efluente.
- Las emisiones, directas o indirectas, de CO₂ no biogénicas asociadas a la generación de la energía requerida para la operación de la PTAR.

En el análisis de este factor se considerarán solo las emisiones descritas en los dos primeros puntos, incluyéndose las emisiones asociadas a la generación de energía, como un elemento más del balance energético que se incluye en el siguiente factor. No obstante, el alcance a considerar en cada caso dependerá de lo que requiera el contexto específico.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer si existen exigencias normativas específicas en cuanto a reducción de emisiones de GEI o si se prevén. En cualquier caso, este factor tendrá la importancia que desde las políticas nacionales se le quiera dar y específicamente para el sector del saneamiento.

A continuación, se analizan diferentes situaciones que pueden incidir en la importancia de este factor.

Tabla 29. Análisis de situaciones donde se valora el factor de “emisión de gases de efecto invernadero”

Muy importante

Existen importantes exigencias normativas en cuanto a limitación de emisiones de GEI.

Importante

Se tiene la certeza de que habrá importantes exigencias normativas en cuanto a limitación de emisiones de GEI dentro del horizonte del proyecto, aunque todavía no vengán contempladas legislativamente.

Influye en la decisión

Existe un compromiso por parte de la entidad promotora del proyecto o por parte del operador de reducir las emisiones de GEI generadas en la operación de la PTAR.

Indiferente

No debería ser indiferente en ningún caso, aunque, si no existe normativa ni concienciación por parte de los promotores y las autoridades, este factor puede llegar a despreciarse.

Por su mayor impacto, en general, este factor será de más relevancia cuanto mayor sea la PTAR, algo que deberá contemplarse en la etapa de ponderación de los criterios del proceso de selección.

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías el aspecto principal a conocer serán el potencial de emisión de gases de efecto invernadero de los procesos de las líneas de tratamiento y si se dispone en ellas de tecnologías para su abatimiento, como por ejemplo antorchas de gas.

La siguiente tabla muestra el potencial de producción de emisiones de GEI para algunas líneas de tratamiento.

Tabla 30. Potencial de producción de emisiones de GEI para algunas líneas de tratamiento (elaboración propia)

Potencial de emisión de GEI	Línea de tratamiento
Alto	LAG / HUMh ¹ / HUMv ¹ / FAFA
Medio	AE / LOMB
Bajo	RAFA+FP / RAFA+CBR / RAFA+LAG / CBR ² / FP ²
Muy bajo	AE sin desnitrificar

¹ Líneas de tratamiento con tanque Imhoff como tratamiento primario

² Con decantación como tratamiento primario y con digestión de lodos anaerobia donde se recupera o quema el biogás generado.

Comparativamente serían los procesos anaerobios donde no se quema o recupere el biogás generado (típicamente tanques Imhoff, fosas sépticas, lagunas anaerobias o FAFA) los que tendrían una peor valoración en este factor. La AE, debido a los procesos de nitrificación/desnitrificación se considera

de potencial medio, así como los lombrifiltros que aunque se consideren proceso aerobios si en algún momento son operados en condiciones anaerobias la emisión de GEI aumenta muy sustancialmente. Las líneas que cuentan con RAFA habitualmente el metano producido se quema en una antorcha y por este motivo se consideran más favorables, aunque siempre puede haber escapes. Los casos más favorables en los que no habría ni emisión ni riesgos de emisión de CH₄ ni de NO₂ como sería el caso de AE sin cámara de desnitrificación en cabecera.

6.6.2 Balance energético

La eficiencia y autosuficiencia energética son objetivos que cada vez tienen más notoriedad en todo tipo de proyectos intensivos en energía y, como no puede ser menos, en proyectos de tratamiento de aguas.

Este factor está relacionado con la emisión indirecta de GEI asociado al consumo de combustibles fósiles para la generación de energía, así como a la economía circular por el aprovechamiento del biogás generado en algunos procesos de tratamiento. Además del aprovechamiento del biogás, en muchos países empieza a imponerse en las propias PTAR la generación energética de fuentes renovables para alcanzar la neutralidad energética.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer si existen exigencias normativas específicas en cuanto a eficiencia y/o neutralidad energética o si se prevé que se implanten en un futuro próximo. Sería necesario conocer también la legislación que regule la recuperación energética, así como de la inyección en la red gasística el biogás producido y la viabilidad de poder materializar esta inyección.

En lo que se refiere a las emisiones indirectas de CO₂ por consumo eléctrico, si la mayor parte de la electricidad producida en el país proviene de fuentes renovables, como sería el caso de Paraguay, el consumo energético repercutirá poco en la emisión de CO₂. Cuanto más dependa del consumo de combustibles fósiles, más importante sería este factor.

A continuación, se analizan diferentes situaciones que pueden incidir en la importancia de este factor.

Tabla 31. Análisis de situaciones donde se valora el factor de “balance energético”

<p>Muy importante Existen importantes exigencias normativas en cuanto a neutralidad energética.</p>
<p>Importante Se tiene la certeza de que habrá importantes exigencias normativas en cuanto a neutralidad energética dentro del horizonte del proyecto, aunque todavía no estén vigentes.</p>
<p>Influye en la decisión Existe un compromiso por parte de la entidad promotora del proyecto o por parte del operador de lograr la neutralidad energética.</p>
<p>Indiferente No debería ser indiferente en ningún caso, aunque, si no existe normativa ni concienciación por parte de los promotores y las autoridades, este factor puede llegar a despreciarse.</p>

Este factor está completamente correlacionado con el factor del costo de la energía dentro de la sostenibilidad económica, por lo que generalmente su importancia en el análisis estará asegurada al menos a través de la sostenibilidad económica.

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías el aspecto principal a conocer será el balance energético de la instalación, calculado a partir de los requerimientos energéticos de los diferentes procesos y elementos de la línea, a los que habrá que restar, en su caso, el que se pueda generar por el aprovechamiento del biogás producido o por otras fuentes de energía renovable que pueda disponer la PTAR

Respecto al balance energético de las instalaciones, en general, las tecnologías extensivas no requieren de un aporte energético externo para la realización de los procesos de tratamiento y, por tanto, su consumo energético va a ser mucho menor que en las intensivas, resultando mucho más favorecidas por este factor.

En instalaciones de tamaño medio y grande que tienen procesos anaerobios de tratamiento, ya sea en la línea de agua (RAFA) o en la de lodos (digestión anaerobia), puede aprovecharse el biogás generado de diversas formas, lo que equilibrará en cierta medida el balance energético de la planta. La recuperación de energía en calderas o motores de cogeneración con la utilización del biogás reduce los requerimientos en energía de la PTAR, llegando en ocasiones incluso a ser neutros o excedentarios energéticamente hablando, y a la vez evita la emisión directa de metano.

La siguiente tabla muestra el potencial de obtener neutralidad energética en algunas líneas de tratamiento.

Tabla 32. Potencial de obtener neutralidad energética en algunas líneas de tratamiento (elaboración propia)

Potencial de obtener neutralidad energética	Línea de tratamiento
Alto	FAFA / RAFA+LAG / LAG/ HUMh / HUMv / LOMB
Medio	CBR / FP / RAFA+FP / RAFA+CBR
Bajo	AE

Las tecnologías extensivas, debido a su escaso consumo energético, son las que tienen un mayor potencial de obtener neutralidad energética. De las tecnologías intensivas las que disponen de tratamientos anaerobios, ya sean en línea de agua o en línea de lodos, tendrían un potencial relativo de obtener neutralidad energética por la posibilidad de recuperar el biogás generado. La aireación extendida, por sus características intensivas e inviabilidad de recuperar energía la haría la menos favorable al respecto.

Los sistemas de recuperación de energía en general requieren de equipos complejos en la línea de gas que deberán ser considerados en la estimación de costos de construcción. Por ello sería necesario no solo estudiar si es viable económicamente hablando, sino también evaluar la disponibilidad de servicio

técnico especializado de equipos de recuperación de energía tan sofisticados como por ejemplo motores o turbinas de cogeneración.

6.6.3 Valorización de lodos

La producción de lodos lleva implícita la obligatoriedad de su gestión y complica, en mayor o menor medida, la operación de una PTAR. La disposición de lodos, al igual que sucedía con el balance energético, siempre va a tener una faceta económica, puesto que puede ser una de las partidas más importantes en los costos de operación y mantenimiento, pero a la vez tiene una faceta ambiental, dado que su valoración permite recuperarlos como un recurso. A la hora de analizar cómo este factor puede influir en la selección del sistema, primeramente, hay que considerar qué opciones existen para la disposición final de lodos y la calidad exigida en cada caso.

Generalmente lo más deseable es que los lodos se puedan aplicar cerca de la PTAR, como enmienda agrícola en agricultura o para regeneración de suelos. La calidad requerida del lodo para estos casos va a depender de lo que marque la normativa existente. Si no existe normativa, en cualquier caso, se debe asegurar al menos que su contenido en metales pesados (concentraciones y cuantías anuales) no sobrepase los valores límites recomendables. En estos casos, además de su calidad, será importante tener en cuenta la cantidad y frecuencia de extracción de los lodos para asegurar que la demanda existente es compatible.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer las posibilidades de valorizar el lodo y la demanda existente, no solo en cantidad sino también en cuanto a estacionalidad requerida.

A continuación, se analizan diferentes situaciones donde el factor de “valorización de lodos” podría tener una importancia diferente.

Tabla 33. Análisis de situaciones donde se valora el factor de “valorización de lodos”

Muy importante

A priori no hay ningún indicio que haga pensar que el lodo generado no sea viable para aplicación agrícola y existe una demanda importante del lodo estabilizado en las inmediaciones de la PTAR.

Importante

A priori no hay ningún indicio que haga pensar que no sea viable la aplicación agrícola del lodo generado, pero no hay demanda del lodo estabilizado en las inmediaciones de la PTAR por lo que habría que considerar su transporte a zonas más alejadas.

Influye en la decisión

Las actividades singulares que vierten a la red de saneamiento hacen que exista riesgo relativo de que no sea viable la aplicación agrícola del lodo o poder aplicarlo en la agricultura supone su transporte a largas distancias, lo que lo hace menos atractivo que otras salidas.

Indiferente

Las actividades singulares que vierten a la red de saneamiento hacen que exista un riesgo significativo de que no sea viable la aplicación agrícola del lodo

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías los aspectos principales a conocer serán la cantidad y calidad del lodo generado, pero también la frecuencia de producción de estos. Por ejemplo, en las lagunas de estabilización la producción específica de lodos es muy baja y el grado de estabilización muy alto por el gran tiempo de retención de los mismos, lo que implica una calidad significativa, pero al procederse a la extracción del mismo con muy poca frecuencia (aproximadamente cada cinco años en lagunas anaerobias y cada 10-15 años en facultativas) se dispondrá de mucho lodo el año de la extracción, lo que puede suponer un obstáculo para poder encajar la oferta y la demanda. A partir de estos atributos se debería valorar la idoneidad de valorización de los lodos en el caso concreto.

Para las instalaciones nuevas donde no se podrá conocer la calidad de lodos que se obtendría, en función de los previsible vertidos que se reciban en la red de colectores se puede estimar al menos si los lodos generados tienen visos de que puedan utilizarse en aplicación agrícola o no.

En la siguiente tabla se muestra una estimación de la cantidad de lodos generados en las distintas líneas de tratamiento propuestas en función del tamaño poblacional y de dos contextos para los que se hizo el estudio.

Tabla 34. Generación de lodos ($m^3/año$) en las líneas de tratamiento consideradas (MMAyA, 2021)

Línea	Clima	Población (habitantes)					
		1.000	2.000	5.000	10.000	25.000	50.000
FAFA	Tropical	25	60	-	-	-	-
RAFA+LA G	Tropical	10	24	63	135	447	1.004
LAG	Altiplano	7	15	48	112	295	669
	Tropical	9	22	59	125	329	736
HUMh	Altiplano	13	33	92	-	-	-
	Tropical	18	43	113	-	-	-
HUMv	Altiplano	13	33	92	-	-	-
	Tropical	18	43	113	-	-	-
LOMB ¹	Altiplano	29	75	229	-	-	-
	Tropical	41	100	281	-	-	-
FP	Altiplano	23	58	162	378	1.019	2.342
RAFA+FP	Tropical	13	30	78	168	535	1.198
CBR	Altiplano	23	58	162	378	1.019	2.342
RAFA+CB R	Tropical	13	30	78	168	535	1.198
AE	Altiplano	24	61	170	398	1.043	2.366
	Tropical	33	80	209	445	1.162	2.604

¹humus de lombriz

Es importante tener en cuenta que los lombrifiltros tienen la característica de que no generan lodos, sino humus de lombriz, un subproducto mucho más fácilmente valorizable que el lodo, lo que supone una clara ventaja con respecto al resto de líneas de tratamiento.

6.6.4 Reúso del agua

El aumento global en la demanda de los recursos hídricos y los desequilibrios cada vez mayores en cuanto a su disponibilidad debidos al cambio climático hace que el reúso del agua se contemple cada vez más como una actividad a potenciar en los proyectos de PTAR. Por otra parte, las aguas tratadas cuentan con un contenido en nutrientes cuyo aprovechamiento puede ser de interés en algunos lugares.

Las posibilidades de reúso del agua dependerán de la calidad del efluente de la PTAR. En caso de existir una normativa, será esta la que determine las pautas del reúso y las tecnologías de regeneración que podrían ser adecuadas para el mismo. En el caso de que no exista normativa específica se aplicarían recomendaciones internacionales. En cualquier caso, es muy importante que la reutilización se lleve a cabo de forma segura y que las tecnologías se seleccionen en función del uso del agua.

Importancia del factor

Desde la perspectiva de las circunstancias locales sería necesario conocer las potenciales demandas para el agua regenerada en las inmediaciones de la PTAR, identificando los usos posibles y los volúmenes demandados en las distintas épocas del año. También sería necesario conocer el tipo de control que debe realizar sobre la calidad del agua y los sistemas de reúso. A continuación, se muestran diferentes situaciones que influirían en la importancia de este factor.

Tabla 35. Análisis de situaciones donde se valora el factor de “reúso del agua”

Muy importante

Existe red de distribución de agua de reúso en el área de influencia de la PTAR.

La PTAR vierte al mar y se encuentra en una cuenca deficitaria donde existe una demanda muy significativa de agua en las zonas cercanas a la PTAR y con muchas posibilidades de que el pago de las tarifas asociadas al reúso cubra los costos de operación y mantenimiento de los tratamientos de regeneración requeridos.

Importante

La PTAR vierte a mar y se encuentra en una cuenca deficitaria y, aunque existe demanda muy significativa de agua en las zonas cercanas a la PTAR, es posible que no se alcance a cobrar unas tasas que cubran completamente los costos de operación y mantenimiento de los tratamientos de regeneración. No obstante, la demanda existente es para tipos de reúso poco exigentes en calidad, como por ejemplo el regadío de cultivos leñosos.

Influye en la decisión

Existe demanda de agua importante en las zonas cercanas a la PTAR, si bien no hay cultura del reúso y es posible que no se pueda reutilizar.

Indiferente

Cuenca excedentaria, con recursos naturales en abundancia para todos los usos. No hay cultura del reúso.

Atributos y puntuación

Desde la perspectiva de las tecnologías, los aspectos principales a conocer serían la calidad del efluente que se consigue en la salida de la línea de tratamiento, en lo que se refiere a la reducción de patógenos y a la facilidad para añadir un tratamiento terciario con desinfección. La siguiente tabla muestra la adecuación para el reúso de las distintas líneas de tratamiento.

Tabla 36. Adecuación para reúso en algunas líneas de tratamiento (elaboración propia)

Adecuación para el reúso	Línea de tratamiento
Alto	RAFA+LAG / LAG
Medio	HUMv / AE / LOMB / CBR / FP
Bajo	HUMh / RAFA+FP / RAFA+CBR/ FAFA

Algunos tipos de tratamientos consiguen una reducción importante de patógenos, como los sistemas de lagunaje o los tratamientos que lleven un lagunaje de afino en cola, los humedales superficiales, la infiltración-percolación o los filtros intermitentes de arena. Este tipo de tratamientos serían los más indicados si existe opción de reutilizar las aguas porque probablemente no requerirían de un tratamiento adicional. En otros tipos de tratamiento sería necesario añadir una etapa final de desinfección para poder reutilizar las aguas. En estos casos, obtener un efluente nitrificado y de buena calidad es un aspecto importante para que funcione más adecuadamente la desinfección. En el caso del lagunaje, sin embargo, la proliferación de fitoplancton suele generar un efluente con un contenido en sólidos muy elevado, por lo que, dependiendo del sistema de riego, pudiera ser necesario un tratamiento de afino para reducir los sólidos en suspensión.

Cuanto más se reduzcan los sólidos en suspensión y la materia orgánica, más eficaces y menos costosos serán los sistemas de desinfección, ya que se requerirán dosis menores de dosis de cloro o de ozono y la transmitancia será mejor en la desinfección por radiación ultravioleta. Además, se generarán menos compuestos organoclorados que pueden ser tóxicos y cancerígenos. Si las aguas no están nitrificadas, se consumirá mucho cloro en la desinfección por la formación de cloraminas. Por estas razones se han considerado más adecuadas las líneas con tecnologías que consiguen un efluente nitrificado (AE) o las que pueden lograrlo con cambios leves en su diseño (LOMB, HUMv, FP y CBR). Los procesos anaerobios en cabecera reducen la carga orgánica pero no los nutrientes, por lo que complican su reducción.

7 PRINCIPALES APORTACIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO

A continuación se resumen las principales aportaciones y recomendaciones para el estudio de alternativas de tratamiento:

- Cuando sobre un problema confluyen muchos factores que incluso pueden llegar a ser contradictorios entre sí, los métodos de análisis de decisión multicriterio son una herramienta imprescindible para apoyar en el proceso de toma de decisiones.
- Estos métodos permiten abordar el problema de decisión multicriterio de una forma sistemática, facilitando el proceso de valoración y mostrando con claridad las diferencias entre las alternativas.
- Sin embargo, no se debe esperar que estos métodos ADMC sean un sustituto de la decisión, sino solo un apoyo. El análisis se basará en la información disponible e, inevitablemente, todo el proceso se alimenta de la subjetividad de los decisores. Por lo tanto, no se trata de modelos predictivos.
- Antes de afrontar un estudio de análisis multicriterio sería recomendable tener un mínimo conocimiento sobre los sistemas ADMC y sobre su aplicación al estudio de alternativas de tratamiento. Aunque con sentido común se pueda llegar a configurar un modelo de decisión lo suficientemente sólido, el conocimiento de experiencias previas y la utilización de guías facilitará que los pasos se vayan dando de una forma más eficaz.
- El contexto en el que se desarrolla el estudio de alternativas determinará el nivel de conocimiento del problema y la fiabilidad de los resultados que se puedan obtener. El estudio no se puede plantear con la misma ambición si se realiza en la fase de identificación de un proyecto que si forma parte de los estudios de un plan director de saneamiento o si la red de saneamiento se encuentra ya construida.
- Cuando forma parte de los estudios de un plan director, el análisis de alternativas estará condicionado por toda una cadena de decisiones que se adoptan dentro del mismo plan.
- Esta guía no pretende dar una receta universal para el estudio de alternativas de tratamiento, sino que defiende precisamente todo lo contrario: las condiciones locales tienen tanta influencia en la decisión que inevitablemente se requiere de la construcción de un modelo de apoyo a la toma de decisiones en cada caso concreto.
- Lo que sí aporta esta guía es toda una serie de recomendaciones sobre la mejor forma de abordar cada una de las tareas del estudio, así como numerosas experiencias y análisis de posibilidades. Todo ello con la intención de facilitar la construcción de esos modelos específicos de una manera más sistemática y robusta.
- El análisis será más correcto cuanto mejor se conozcan los objetivos del problema, los condicionantes locales, las alternativas y los riesgos, por lo que los procesos de obtención de información van a ser fundamentales.
- Esta guía da mucha importancia a la obtención de la información correcta y, por ello, dedica dos anexos específicos a esta materia; el primero trata sobre el conocimiento de las condiciones locales y el segundo sobre las tecnologías de tratamiento. En ambos anexos se incluyen numerosas recomendaciones para llegar al mejor conocimiento posible.
- Asimismo, se considera fundamental que la valoración de las líneas de tratamiento se realice tras la obtención de unos diseños básicos, que permitan conocer cómo se adaptarían las alternativas a las condiciones locales.

- Respecto a la propuesta metodológica introducida en el capítulo 5 se podrían sintetizar las siguientes recomendaciones principales:
 - Se propone una metodología basada en la identificación de criterios, su ponderación y evaluación en matrices multicriterio con un modelo aditivo para obtener un índice general. A pesar de las dificultades intrínsecas del método, se ha seleccionado este sistema por su sencillez y flexibilidad y por resultar sencillo de entender en un contexto donde esta cualidad va a ser fundamental.
 - Dada la complejidad del proceso es conveniente emplear hojas de cálculo para construir el modelo de decisión que, además, permitan la realización de análisis de sensibilidad.
 - Las alternativas a comparar están constituidas por las líneas completas de tratamiento, de agua y de lodos. Realizar el análisis por cada una de las etapas de tratamiento independiente se considera una mala praxis en general, dado que el dimensionamiento y el comportamiento de cada proceso unitario estará condicionado por las etapas anteriores y posteriores.
 - Si bien, algunas etapas de afino, como el terciario o el cuaternario, en algunos casos podrían evaluarse por separado, cuando todas las alternativas alcanzan rendimientos equiparables después del tratamiento secundario.
 - Esto no es incompatible con que alguno de los factores considerados en el estudio resulte más conveniente valorarlo por tecnología y no por líneas.
 - La amplísima diversidad de tecnologías de tratamiento existentes obligará a realizar un proceso en doble etapa, con una selección previa de alternativas a valorar.
 - El estudio de los factores o criterios que pueden influir en la decisión es la base del análisis multicriterio y debe realizarse de una manera concienzuda. Al respecto se destaca:
 - La identificación de los factores importantes para la decisión, junto con la selección de los atributos de las alternativas que permitan valorarlos se sustenta en el conocimiento del proyecto y sus objetivos, de los condicionantes locales y de las alternativas.
 - Por su importancia en la identificación y estructuración de factores se dedica un apartado específico al análisis de los objetivos técnicos y de sostenibilidad que deberían guiar un proyecto de tratamiento de aguas.
 - Dentro de los criterios se deben identificar aquellos que puedan imponer una limitación para algunas de las alternativas y, a partir de los mismos, se realizará la selección previa de líneas de tratamiento
 - La introducción de los criterios en la valoración debería realizarse de la forma más estructurada posible, con el fin de aportar coherencia, claridad y sencillez al proceso, para lo que se recomienda la agrupación de los criterios temáticamente en ámbitos y en forma de árboles de valores.
 - En este texto los criterios se han agrupado tomando como referencia las principales facetas de la sostenibilidad del servicio (técnica, económica, social y ambiental).
 - Se incluye un extenso capítulo donde se pasa revista a los factores más frecuentemente utilizados en los procesos de valoración, analizándolos desde sus dos caras: las condiciones locales que determinan su importancia y los atributos de las alternativas con los que se pueden medir y valorar.

- La valoración para cada uno de los criterios se disgrega en dos elementos, lo que permite acotar la subjetividad: la ponderación de la importancia de cada factor sobre la decisión y la puntuación de cada alternativa para cada factor.
 - La ponderación de criterios es una etapa muy importante que no siempre se interpreta adecuadamente, por lo que el texto le dedica un análisis detallado y numerosas recomendaciones.
 - El peso que cada criterio debería tener sobre la decisión final es una cuestión subjetiva que responde a cómo le afecta el problema a cada agente interesado. Por ello los pesos que se adopten deberían ser el resultado del mayor consenso posible.
 - El establecimiento de los sistemas de puntuación y las puntuaciones a asignar a los factores son aspectos sensibles y deben de contemplarse de modo que las puntuaciones reflejen no únicamente la diferencia entre alternativas en términos relativos, sino que tengan en cuenta en qué medida son o no adecuadas con respecto al factor analizado.
- Una vez obtenidos los resultados parciales de la valoración, debería reflexionarse hasta qué punto resulta representativo un único valor general. En la mayor parte de los casos van a resultar tan útiles los resultados parciales por criterios como el valor general para sustentar la decisión.
 - A pesar de los esfuerzos que se hagan por conocer en detalle todos los aspectos que condicionan la decisión, inevitablemente existirán indeterminaciones y riesgos que, en caso de ser importantes, deberían tomarse en consideración, tanto en la construcción del modelo de decisión como en la evaluación de resultados.
 - La reflexión final y más importante sería que encontrar las soluciones de tratamiento más sostenibles no puede ser una tarea exclusiva del estudio de alternativas. Mucho antes de llegar a ese momento, según se vaya adoptando toda la cadena de decisiones que pueden condicionar la selección, debería tenerse presente las repercusiones de cada decisión sobre las alternativas de tratamiento.
 - En este sentido, cuando un país define sus políticas y estrategias, las normativas y la planificación sectorial del saneamiento, debería integrar como un objetivo primordial la sostenibilidad de las plantas de tratamiento, de tal forma que todo el marco de desarrollo facilite alcanzar las soluciones óptimas en cada población.

8 REFERENCIAS

- AECID. (2021a). *Análisis de normativas latinoamericanas sobre vertidos de poblaciones* (p. 128). Fondo de Cooperación de Agua y Saneamiento (FCAS). Retrieved from https://www.aecid.es/Centro-Documentacion/Documentos/FCAS/Generales/Análisis-de-normativas-latinoamericanas-sobre-vertidos-de-poblaciones_v8_A.pdf
- AECID. (2021b). *Metodologías para la estimación de costos de tratamiento de aguas residuales en la planificación sectorial* (p. 115). Fondo de Cooperación de Agua y Saneamiento (FCAS). Retrieved from https://www.aecid.es/Centro-Documentacion/Documentos/FCAS/Generales/Estimación-costos-final_v8_A.pdf
- Amy, G., Brdjanovic, D., Comeau, Y., Edama, G. A., Orozco García, J. H., & Al, E. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios modelación y diseño* (C. M. López Vázquez, G. Buitrón Méndez, H. A. García, & F. J. Cervantes Carrillo (eds.); 1ª edición). IWA publishing. doi: 10.2166/9781780409146
- Baquero-Rodríguez, G. A., Martínez, S., Acuña, J., Nolasco, D., & Rosso, D. (2022). How elevation dictates technology selection in biological wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 307. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114588
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Gambrill, M. (2022). *A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options* (p. 144). Washington, D.C.: World Bank Group. Retrieved from <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/37317>
- CE. (2004). *Líneas directrices. Gestión del ciclo de proyecto* (p. 149). Comisión Europea.
- CEPIS. (2003). *Hojas de Divulgación Técnica: Algoritmo Para La Selección De Tecnología Para El Abastecimiento Rural De Agua*. 8.
- MARM. (2010). *Manual para la Implantación de Sistemas de Depuración en Pequeñas Poblaciones* (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (ed.)).
- MARN. (2016). *Recomendaciones para la Selección de Tratamientos de Depuración de Aguas Residuales Urbanas en la República de El Salvador*.
- Márquez-Peláez, S., Espín, J., Olry de Labry, A., Benítez, V., & Grupo de trabajo Redets para MCDA. (2020). *Guía para la elaboración de recomendaciones basadas en Análisis de decisión multicriterio (MCDA)*. Red Española de Agencias de Evaluación de Tecnologías Sanitarias.
- MMAyA. (2021). *Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua (Bolivia). Retrieved from <https://vapsb.mmaya.gob.bo/index.php/normas/>
- OMM. (2022). *Estado del clima en América Latina y el Caribe. 2021*. Retrieved from <https://reliefweb.int/report/world/estado-del-clima-en-america-latina-y-el-caribe-2021>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1(1), 16.
- Thokala, P., Devlin, N., Marsh, K., Baltussen, R., Boysen, M., Kalo, Z., Longrenn, T., Mussen, F., Peacock, S., Watkins, J., & Ijzerman, M. (2016). Multiple criteria decision analysis for health care decision making - An introduction: Report 1 of the ISPOR MCDA Emerging Good Practices Task Force. *Value in Health*, 19(1), 1–13. doi: 10.1016/j.jval.2015.12.003
- Von Sperling, Marcos; De Lemos Chernicharo, C. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. Londres (Reino Unido): IWA.
- Wagner, W. (2010). *Recomendaciones para la Elección de Plantas de Tratamiento de Agua Residual Aptas para Bolivia*.
- WBCSD & WRI. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard*.

Revised Edition (p. 112). Retrieved from <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>

Zozaya González, N., Oliva Moreno, J., & Hidalgo Vega, Á. (2018). *El Análisis de Decisión Multi-Criterio en el ámbito sanitario. Utilidad y limitaciones para la toma de decisiones* (F. Weber (ed.)). Madrid.

ANEXO I: CONOCIMIENTO DE LAS CONDICIONES LOCALES

CONTENIDOS DEL ANEXO I

I.1	INTRODUCCIÓN	123
I.2	REVISIÓN DE LA NORMATIVA DE APLICACIÓN	123
I.3	LA POBLACIÓN Y SU ENTORNO	125
I.4	ENTIDAD PRESTADORA DEL SERVICIO	126
I.5	ESTADO DE LAS INFRAESTRUCTURAS Y SERVICIOS EXISTENTES	127
I.6	CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES	128
I.7	CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO DE LA PTAR	131
I.8	CONOCIMIENTO DE PRECIOS LOCALES	135

I.1 INTRODUCCIÓN

Para poder construir y valorar el modelo de decisión y tomar una decisión fundamentada, es necesario previamente definir claramente el problema a evaluar en todos sus aspectos y conocer el contexto en profundidad, identificando todos los condicionantes de los objetivos y de las alternativas. Dentro del ciclo de proyecto de tratamiento de aguas residuales, esta información se adquiere por medio de los estudios previos de la fase de preparación del proyecto. Estos estudios son necesarios, además, para establecer las bases del desarrollo del proyecto.

Los estudios que será necesario acometer en cada caso, obviamente, dependerán de la información disponible. Tal como se señala en el capítulo 3, el nivel de conocimiento que se pueda tener al inicio de los trabajos va a ser muy diferente dependiendo del tipo de proyecto. Cuando solo se trate de construir o remodelar una PTAR y ya exista una red de saneamiento operativa, gran parte de la información necesaria estará disponible y será de buena calidad, mientras que, si el estudio de alternativas se realiza dentro de un plan director para desarrollar todo el saneamiento, habrá muchas cuestiones que solo podrán estimarse. En este caso resulta especialmente importante asegurar que toda la información esencial para definir la planta de tratamiento se obtiene antes de afrontar el estudio de alternativas. En muchas ocasiones la mala programación de los estudios requeridos hace que se pospongan hasta bien avanzada la fase de formulación del proyecto, en ocasiones hasta con posterioridad a la realización del análisis de alternativas, justo antes de comenzar con el diseño y proyecto de construcción definitivo. Esto conlleva ineficiencias importantes e incluso en ocasiones a resultados inesperados que hace que el estudio de alternativas realizado no resulte válido y se deba repetir. Por este motivo es sumamente importante que estos estudios se planifiquen bien y puedan llevarse a cabo con margen suficiente para tenerlos disponibles ya para el estudio de alternativas.

No es el objetivo de este anexo hacer una revisión exhaustiva y pormenorizada de todos los estudios previos necesarios en un proyecto de PTAR, sino solo aportar una serie de recomendaciones que sería conveniente tener en cuenta al realizar estos estudios, para facilitar el análisis de alternativas.

En los siguientes apartados de este anexo se describen las partes especialmente relevantes de los estudios previos más importantes que resultan claves para la selección de tecnologías

I.2 REVISIÓN DE LA NORMATIVA DE APLICACIÓN

Será necesaria la revisión de toda la normativa que puedan afectar al proyecto, en especial la relativa a los siguientes aspectos:

- **Normativa sobre vertidos y calidad de las aguas**, ya que serán las que determinarán los requerimientos legislativos del vertido de la PTAR o del medio receptor del vertido, y que, como es lógico, será un condicionante muy importante de la selección de tecnologías. En Latinoamérica se puede encontrar una gran diversidad de normas, no solo en cuanto a límites de vertido, sino en lo referente a la forma en la que se establecen estas normas. Incluso. Esta diversidad se puede encontrar también entre las diferentes regiones en algunos países federales, como Argentina. En algunos casos, la aplicación de la normativa exige ya la realización de estudios previos específicos, pues se deben determinar las características del medio receptor para poder establecer los límites a imponer al vuelco. En la publicación Análisis de normativas latinoamericanas sobre vertidos de poblaciones. Una guía para su revisión (AECID, 2021a) se analiza la diversidad de normas y los procedimientos

para aplicarlas que existen en la región latinoamericana. El siguiente box se analiza un cuadro comparativo de diferentes normativas latinoamericanas, ilustrando la variabilidad comentada.

- **Normativa sobre reúso del agua**, ya que determinará los límites en cuanto a calidad del efluente tratado en el caso de que se vayan a reutilizar las aguas, lo que sería un condicionante muy importante de la selección de tecnologías.
- **Normativa sobre gestión de lodos**, ya que determinará los límites en cuanto a calidad del lodo de la PTAR y podría ser un condicionante a tener en cuenta en el proceso de selección de tecnologías y también a la hora de definir los objetivos del proyecto, ya que podría condicionar el destino del lodo generado.

Box 4. Normativas de vertido en Latinoamérica

En Latinoamérica existe mucha variabilidad en cuanto a los límites específicos definidos por las distintas normas. La siguiente tabla expone los límites normativos de seis países de la región con un contexto climatológico y socioeconómico bastante similar, evidenciando esta variabilidad.

Comparativa de límites de vertido de diferentes países para vertidos de poblaciones (adaptada de AECID, 2021a).

Parámetro	Cuba ⁽¹⁾	Honduras	El Salvador	Bolivia	Guatemala ⁽²⁾	Nicaragua
DBO ₅ (mg/L)	30-40-60	50	60	80	100	110
DQO (mg/L)	70-90-120	200	150	---	---	220
SST (mg/L)	---	100	60	60	100	80
P total (mg/L)	2-4-10	5	---	---	10	10
N amoniacal (mg/L)	---	20	---	4	---	---
NTK (mg/L)	5-10-20	30	---	---	---	---
N total (mg/L)	---	---	---	---	20	30
CF (NMP/100mL)	--- ⁽³⁾	5×10 ³	--- ⁽⁴⁾	1×10 ³	1×10 ⁴	1×10 ³ ⁽⁵⁾

(1) Para ríos y embalses, dependiendo del tipo A-B-C

(2) Los límites establecidos en esta tabla corresponden con los límites impuestos para municipalidades que deberán ser alcanzados antes de 2032

(3) La norma técnica de calidad del agua como medio receptor que se establezca, debe tomar de referencia un valor de 1.000 UFC/100mL

(4) En aguas superficiales terrestres se regula por norma de inmisión y solo para las clases A y B (200-1000, respectivamente para superficiales). En vertidos a zonas costeras, sin embargo, sí cuenta con límites de emisión, que varían entre 200 y 1000, dependiendo de la clasificación del medio.

(5) Para el periodo 2027-2030

Comparativamente, se puede ver que los límites generales establecidos para la DBO₅ en la norma nicaragüense y guatemalteca son mucho más laxos que en el caso de las normativas de El Salvador y Honduras.

El problema de los límites que no se pueden cumplir con tratamientos convencionales

En algunos países se imponen límites para nutrientes muy difíciles de alcanzar, como los 5 mg/L para el fósforo total en Honduras o incluso límites de 2 mg/L en los ríos tipo A de Cuba. Estos límites no es posible alcanzarlos con tratamientos convencionales, lo que encarecerá mucho el tratamiento.

Se observa también una heterogeneidad en la relación DQO/DBO₅, parámetros que están íntimamente relacionados desde el punto de vista del tratamiento de las aguas residuales. En las

aguas brutas dicha relación se encuentra en el rango de 1,2 a 2 para las aguas urbanas, pero después de un tratamiento biológico, el efluente consigue una reducción de la DBO₅ con un rendimiento del 90% aproximadamente, y la relación DQO/DBO se eleva, pudiendo llegar a 5. En el caso de Cuba se puede observar que esta relación DQO/DBO es excesivamente baja, por lo que realmente el límite lo determinará la DQO y no la DBO. De hecho, los valores impuestos para la DQO serán tan difíciles de alcanzar que requerirían de un tratamiento terciario o cuaternario.

Respecto a los coliformes fecales también hay diferencias, El Salvador ha optado por no imponer un límite específico, mientras que el resto lo limitan de manera importante. Alcanzar niveles de coliformes fecales por debajo de 1×10^4 requiere de un tratamiento de desinfección y, si se ha de implantar un tratamiento terciario de desinfección, la reducción de la DBO₅ y de los SS debería ser mucho más elevada de lo que se exige.

Aunque en lo referente a vertidos normalmente siempre va a haber una normativa, no ocurre lo mismo con el reúso del agua y la disposición de lodos, ya que en muchos países todavía no existe normativa. En estos casos lo más adecuado será recurrir a recomendaciones internacionales genéricas o a normas regionales que sean de referencia. Durante los estudios previos se deberá realizar una revisión pormenorizada de estas normas o recomendaciones y valorar su aplicación en el proyecto concreto.

Al margen de lo comentado, será muy importante conocer también otras normas que puedan condicionar el proyecto, como sería la regulación del uso del suelo y planificación urbanística, pues pueden tener una influencia muy importante en la determinación la ubicación de la planta, así como en el alcance futuro de la red de saneamiento, lo que a su vez condiciona las características del agua residual. Asimismo, en diferentes países se regula la distancia mínima que debe existir entre la PTAR y la población para evitar molestias, aunque esta separación no siempre es posible cumplirla. Cuando existe esta regulación y se respeta, generalmente los riesgos de afección a la población serán menores que si no existe o no se puede respetar.

I.3 LA POBLACIÓN Y SU ENTORNO

Hay muchos aspectos de la población y su entorno que van a condicionar la selección de alternativas de tratamiento, bien porque afecten a los objetivos y desarrollo del proyecto o bien porque determinan el tipo de líneas de tratamiento viables. Entre ellos, sería necesario conocer:

- **Entorno del terreno de la PTAR.**
 - Los asentamientos de población y actividades que tienen lugar en el entorno del terreno de la podrían verse afectadas por la actividad de esta y las posibles molestias constituirán un factor a tener en cuenta en el proceso de selección. Es recomendable al respecto realizar visitas de campo, contrastar las impresiones de la visita con técnicos de la municipalidad y conocer las características de las viviendas, incluyendo legalidad de las mismas.
 - Vías públicas de acceso al terreno y sus características (de tierra o asfaltadas; dificultades de acceso para camiones; rutas alternativas).
 - Las zonas naturales protegidas o especialmente sensibles y especies que podrían sufrir impactos significativos por la actividad de la PTAR. Los posibles impactos podrían ser determinantes en el proceso de selección de tecnologías. Sería necesario investigar si

existen zonas que cuenten con algún tipo de protección medioambiental en el área de influencia de la PTAR y en el medio receptor de la descarga, para lo que sería adecuado, entre otros, consultar a los técnicos de la municipalidad, habiendo hecho una búsqueda previa.

- **El posicionamiento de la población frente al proyecto**

- **La concienciación de la población y su grado de compromiso con el proyecto** es un aspecto al que muchas veces no se le presta la necesaria atención. Puede ser un factor muy relevante en la buena marcha del proyecto y puede condicionar la selección de alternativas. Es necesario abordarlo adecuadamente para involucrar a la población en el proyecto, que conozcan de primera mano las dificultades del proyecto y que puedan mediante sus representantes expresar su opinión e inquietudes acerca del mismo. En la selección de alternativas facilitará que conozcan las implicaciones de las distintas alternativas planteadas y la fluidez en la comunicación y entendimiento en el proceso de decisión. Este debería constituir en sí mismo un eje de desarrollo del proyecto.
- **La capacidad y la disposición al pago de la población** con respecto al servicio de tratamiento de aguas residuales. Estos aspectos serán determinantes de los costos de O&M que se puedan asumir por el prestador, por lo que debe condicionar la selección de las tecnologías. Este aspecto resulta especialmente relevante en pequeñas poblaciones donde la economía de escala hará que los costos por habitante sean mucho mayores. Para analizar esta información se podría acudir a estadísticas y agregados macroeconómicos de la población que disponga la municipalidad o a la información de detalle del censo de población, que podría aportar bastante luz al respecto, aunque suele ser preferible realizar encuestas a los usuarios.

- **Disponibilidad de mano de obra local y materiales de construcción.** Estos aspectos podrían incidir significativamente en los costos de inversión y de O&M, e inclinar la selección hacia determinadas tecnologías. Por otra parte, en algunos casos es parte de los objetivos de la actuación generar trabajo y potenciar la actividad industrial. En otros, la contribución de la población en los costos de construcción se materializa con su trabajo en las obras. Por todo ello, se deben conocer estos aspectos para su consideración en el proceso de selección de tecnologías.

Será necesario evaluar, por un lado, la industria local y regional en cuanto a materiales de construcción (hormigón, acero, áridos...) y, por otro, la disponibilidad de materiales en la zona en la propia naturaleza, así como entrevistar a los técnicos de la municipalidad encargados de la ejecución de obras o con las unidades ejecutoras otras administraciones de mayor nivel. Por ejemplo, los humedales subsuperficiales, los filtros percoladores de piedra, los filtros anaerobios de flujo ascendente, entre otras tecnologías utilizan de relleno áridos con una granulometría determinada y, en el caso de disponerlos sin costo alguno estas tecnologías tendrían una ventaja comparativa con respecto a otras.

I.4 ENTIDAD PRESTADORA DEL SERVICIO

Para realizar una adecuada selección de alternativas resulta fundamental tener un adecuado conocimiento de la entidad que va a operar la PTAR. Sería necesario conocerlos siguientes aspectos:

- **Capacidad técnica de la entidad.** La capacidad de los servicios técnicos del prestador determinará la complejidad que sería aceptable para las tecnologías de la PTAR y por tanto afectaría de un modo muy relevante al proceso de selección. Para analizar este aspecto serían

requeridas entrevistas con los responsables de la entidad operadora y conocer de qué técnicos y operarios dispone con capacidad para asumir la operación de las instalaciones o, en su defecto, las provisiones de capacitación o de contratación de nuevo personal.

- **Control de vertidos a la red.** Es deseable evaluar qué tipo de seguimiento se lleva de los vertidos singulares en red de saneamiento por parte de la autoridad competente y de los medios disponibles para este fin. En muchas poblaciones, especialmente en las más pequeñas y con menos recursos es habitual que este control sea muy limitado, si no nulo, y esto puede ser un motivo para que los vertidos singulares incumplan sistemáticamente los límites establecidos y las cargas que realmente reciba la PTAR sean mayores a las planificadas. Este riesgo puede ser importante tenerlo en cuenta en el proceso de selección de tecnologías, conjuntamente con el tipo de actividades singulares que existan en la población.

Para analizar este aspecto serían requeridas entrevistas con los responsables de la entidad operadora o de la autoridad competente del control de vertidos a la red de saneamiento.

- **Solvencia económica de la entidad operadora** de la PTAR, teniendo en cuenta todos los servicios que presta, además del tratamiento de aguas.
- **Calidad de los servicios de abastecimiento y saneamiento existentes**, sus sistemas tarifarios y la morosidad. Va a resultar muy difícil, si no imposible, que una población asuma pagar el servicio de saneamiento y tratamiento de aguas residuales cuando el servicio de abastecimiento es de mala calidad y existe un problema de morosidad por rechazo de la población.

Estos aspectos, junto con la solvencia económica del prestador serán determinantes de la disponibilidad presupuestaria para la O&M de la PTAR. Para su análisis serían requeridas entrevistas con los responsables de la entidad operadora de la PTAR y de los sistemas de agua potable y saneamiento y el análisis de la contabilidad de estas entidades durante los últimos años. En el caso de la calidad del servicio sería adecuado realizar encuestas a los usuarios.

- **Experiencias y preferencias de la entidad operadora** respecto a posibles tecnologías de tratamiento para la PTAR, ya que podría ser un factor a tener en cuenta en el proceso de selección de tecnologías. Para su análisis serían requeridas entrevistas con los responsables técnicos de la entidad operadora donde se abordasen las tecnologías que han operado y sus experiencias al respecto, tanto positivas como negativas.

En los proyectos donde no se cuente con un operador con suficientes capacidades para prestar el servicio de un modo adecuado resultará imprescindible que en el mismo proyecto se prevea su desarrollo. Este desarrollo podría prever medidas como capacitaciones específicas, mantenimiento durante un tiempo de las instalaciones mientras se forma el personal, integración del prestador en una entidad supramunicipal o el suministro de apoyo por parte de otros prestadores de la región con mayor capacidad. Los desarrollos que se prevean en este eje tendrían una incidencia significativa en el proceso de selección de alternativas ya que cambiarían las características del prestador que se tienen en cuenta en el proceso de decisión.

I.5 ESTADO DE LAS INFRAESTRUCTURAS Y SERVICIOS EXISTENTES

Es necesario conocer las características y el estado de las instalaciones y servicios que puedan influir en las aguas residuales y en la PTAR, como serían: el suministro de agua potable, la red de saneamiento, el servicio de recogida de excretas de los sistemas unitarios, el sistema de drenaje de aguas pluviales o incluso la recolección de residuos sólidos urbanos. El conocimiento del estado de estos servicios va a permitir, por una parte, aventurar posibles problemas que se puedan presentar en el futuro y, por

otra, conocer en qué medida quedan condicionados los caudales y cargas contaminantes de entrada a la PTAR y cómo influirá en el diseño y en el funcionamiento de la PTAR. En concreto sería necesario conocer:

- **Infraestructuras existentes**, detallando sus componentes principales, su estado y su capacidad. Si el sistema de abastecimiento no se encuentra en buen estado, debería rehabilitarse a la vez que se desarrolla el saneamiento y tratamiento. Si la red de saneamiento no se encuentra en buen estado (roturas, atascos, infiltraciones, desbordamientos, etc.), debería rehabilitarse para que la PTAR pueda funcionar adecuadamente, y estas actuaciones podrían condicionar de un modo importante la disponibilidad presupuestaria para la ejecución de la PTAR.
- **Previsión de ampliación y mejora de las infraestructuras.** Es fundamental para el proyecto conocer el alcance y calidad de los servicios afectados y las repercusiones que tendrían en la PTAR. Por ejemplo, una mejora en la red de pluviales podría implicar una menor entrada de caudales y residuos a la red de saneamiento y, por tanto, un dimensionamiento menor de las instalaciones y una reducción del riesgo de atascos y roturas en los equipos electromecánicos del pretratamiento de la PTAR.

Este estudio requiere realizar entrevistas con los responsables técnicos de los sistemas de agua potable, saneamiento y recolección de aguas pluviales para conocer los componentes más importantes de los sistemas y su opinión con respecto al estado y capacidad de los mismos, así como de las necesidades existentes. Posteriormente sería necesario recopilar los planos as-built e historiales referentes al agua recibida (registros de caudal, número de conexiones...) por los componentes más relevantes. Una vez analizada esta información será necesario realizar visitas de inspección para contrastar toda la información recabada.

1.6 CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Es necesario caracterizar algunas variables ambientales que son relevantes porque condicionan los procesos de tratamiento de las aguas residuales. En algunos países no existe mucha diversidad ambiental, mientras que en otros se pueden encontrar diferencias extremas de unas regiones a otras, condicionando comportamientos en los procesos radicalmente diferentes de un lugar a otro. En cualquier caso, siempre va a ser necesario conocer estas variables por su importante efecto en el dimensionamiento de los procesos. La mayor parte de la información para caracterizar ambientalmente la zona va a estar fácilmente accesible y su estudio no será problemático. Si bien, se destacan algunos aspectos a tomar en consideración:

- **Temperatura del agua.** La temperatura del agua es una variable que va a condicionar el dimensionamiento de la práctica totalidad de los procesos biológicos. En algunos casos, como ya se ha visto, las temperaturas bajas podría ser incluso un factor limitante para algunas tecnologías. En concreto la variable principal que se suele tomar de referencia para los dimensionamientos es la temperatura media del agua durante el mes más frío. La temperatura del agua dentro del reactor donde se desarrolla un proceso determinado vendrá condicionada por la temperatura del influente al reactor y la temperatura ambiente. La influencia de cada uno de estos factores dependerá básicamente del tiempo de retención del agua dentro del reactor, de las dimensiones del mismo (superficie de intercambio relativa) y de su aislamiento.

A su vez, la temperatura del agua residual que llega a la PTAR viene determinada por la temperatura del agua potable suministrada, los hábitos de la población, la posible descarga de efluentes industriales de temperatura elevada, la entrada de agua pluvial o de agua de mar en las zonas costeras y por su evolución dentro de la red de saneamiento, condicionada a su vez por la temperatura ambiente y por la longitud y profundidad de la red de saneamiento. Para determinarla sería necesario realizar campañas de caracterización en la entrada de la PTAR.

En el caso de que no sea posible realizar campañas de caracterización del influente a la instalación se podría determinar en función de variables como la temperatura del aire y el tiempo de retención promedio del agua en la red de saneamiento. La temperatura del aire se puede determinar estadísticamente a partir de registros meteorológicos y el tiempo de retención en la red de saneamiento mediante modelos basados en la extensión de la red.

La temperatura del aire, además, será una variable determinante para dimensionar los procesos con tiempos de retención hidráulica muy elevados como sería el caso de las lagunas de estabilización, puesto que condicionará la temperatura del agua en mucho mayor grado que la propia entrada del agua.

Además, se debe tener en cuenta que la temperatura del agua residual puede variar entre un proceso y el siguiente en la línea de tratamiento debido a la influencia de la temperatura ambiente.

En aquellas poblaciones donde la temperatura ambiente se aproxime a los valores que resultan limitantes para alguna tecnología, como es el caso de los procesos anaerobios, un aspecto que puede ser determinante es si las redes son combinadas o si, debido a su mal estado, pueden entrar aportes importantes de aguas pluviales. La entrada de agua de lluvia en temporada fría puede rebajar la temperatura del agua residual por debajo de los umbrales límite, decayendo el rendimiento del proceso anaerobio sustancialmente y generando, en consecuencia, un efluente de mala calidad. Si el proceso anaerobio va seguido de una laguna u otro proceso con un tiempo de retención hidráulico importante podrá seguramente amortiguar estas puntas de salida. Sin embargo, si va seguido de un tratamiento intensivo, que en el momento de lluvia incluso tendrá menor tiempo de retención debido al incremento de caudal, a pesar de la mejora de la eficiencia que pueda lograr, la calidad de salida de la planta se resentirá. Por ello, aunque frecuentemente en la bibliografía se cite el umbral de 15°C como el límite mínimo de los procesos anaerobios, en estas recomendaciones prefiriere establecerse en 16°C.

Además de la influencia directa sobre los procesos biológicos, se debe tener en cuenta que la temperatura también condiciona la solubilidad de los gases, aumentando cuanto más baja sea la temperatura y, por tanto, todos aquellos procesos que requieran de un aporte de oxígeno o que generen gases en el tratamiento verán condicionado su funcionamiento por su nivel. Por ejemplo, según disminuye la temperatura, el proceso de lodos activados será menos eficiente y se requerirá mayores dimensiones de reactor y más tiempo de retención celular o edad del lodo que, a su vez, supondrá una mayor demanda de aire. Sin embargo, se compensa energéticamente en parte, porque aumenta la solubilidad del oxígeno.

La solubilidad del metano en el agua es muy baja, sin embargo, se ha visto que parte del mismo escapa disuelto en el efluente de los tratamientos anaerobios. Este escape de metano también se verá incrementado a temperaturas bajas.

- **Pluviometría.** Es una variable que puede condicionar el diseño de procesos de deshidratación extensiva de lodos, como son los lechos de secado y también puede resultar relevante para la determinación de las características del agua residual, principalmente cuando

las redes son unitarias o cuando el mal estado de las redes hace que la infiltración sea un problema muy importante.

La variable que se suele tomar de referencia es la precipitación promedio del mes más lluvioso en el terreno de la PTAR y se determina estadísticamente a partir de registros de la estación meteorológica más cercana. No obstante, en el diseño de los lechos de secado, cuando la descarga de lodos se hace con una baja frecuencia, como podría ser el caso de tanques sépticos, tanques Imhoff o más aún de lagunas anaerobias, la variable relevante podría ser otra más adecuada al contexto como la precipitación promedio del tercer mes consecutivo más lluvioso, puesto que podrá evitarse el mes más lluvioso para secar los lodos.

Otro condicionante derivado de la pluviometría es la afección que pueden generar sobre los terrenos de la PTAR si no se prevé un buen drenaje de la parcela y sobre el acceso a las instalaciones, que debería estar siempre practicable para el acceso con camiones.

- **Altitud sobre el nivel del mar.** La elevación sobre el nivel del mar es uno de los factores ambientales más relevantes a considerar durante la selección, diseño y/u optimización de los procesos de tratamiento de aguas residuales (Baquero-Rodríguez et al., 2022).

Esta variable es importante porque la presión, al igual que la temperatura, influye de manera importante en la solubilidad del oxígeno en el agua y será, por tanto, muy relevante a efectos de diseño en procesos intensivos basados en la aportación de aire, como sería el caso de los procesos de lodos activados. A medida que disminuye la eficiencia de transferencia de oxígeno (OTE-oxygen transferefficiency) con el aumento de la altitud, aumenta la inversión en equipos de aireación y también los costos de operación y mantenimiento. Es habitual que algunas modalidades de estos procesos, con tiempos de retención hidráulica elevados, como la aireación extendida, se consideren prohibitivas en contextos de elevada altitud, como podría ser el Altiplano andino. En el caso de que el proyecto se desarrolle en estas grandes altitudes, se debe tener en cuenta además que, debido a su singularidad, no son unas condiciones que hayan tomado en consideración la mayor parte de las publicaciones técnicas en la materia, por lo que las recomendaciones de diseño y las referencias de estas guías deben considerarse con prudencia. En consecuencia, existe la necesidad de comprender las implicaciones de la gran altitud en la eficiencia de los sistemas tradicionales de lodos activados (G.A. Baquero-Rodríguez et al.).

Variaciones debidas al cambio climático. En Latinoamérica hay zonas donde todos los modelos prevén que pueden verse especialmente afectadas por los efectos del cambio climático. En general se prevén aumentos de la temperatura y de la frecuencia de eventos climáticos extremos. La figura muestra la anomalía registrada ya en las temperaturas en diferentes regiones de Latinoamérica.

Resulta conveniente conocer los riesgos esperados en la zona y prever las vulnerabilidades del sistema de saneamiento y de la PTAR.

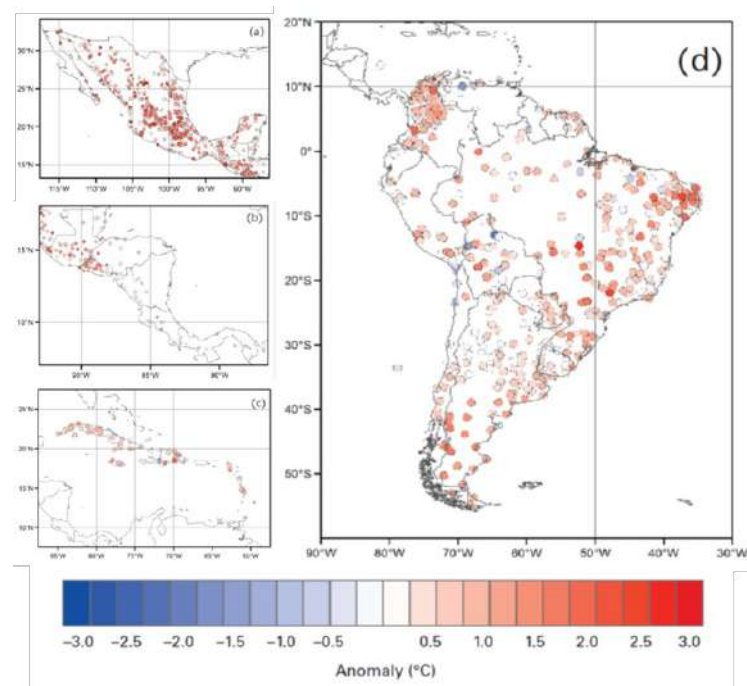


Figura 1.1. Anomalías de la temperatura en 2021 con respecto al periodo 1981-2010. Fuente: Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (OMM, 2022)

- Otras variables ambientales.** Aunque menos relevantes, otros aspectos como la dirección predominante de los vientos, el nivel de radiación solar y la humedad, también se deben conocer, porque pueden afectar a la selección y el diseño de determinadas tecnologías. Así, por ejemplo, si contamos con un terreno estrecho orientado a los vientos preferentes puede ser un hándicap para implantar lagunas de estabilización, puesto que se puede generar un movimiento preferencial del agua reduciendo el tiempo de retención o la generación de un oleaje que rebase el borde de la laguna y afecte a la estructura de los diques de cierre. También los vientos predominantes condicionarán la mayor o menor probabilidad de impacto en la población cercana por los olores o los aerosoles que se puedan generar en las instalaciones. El nivel de radiación solar o la humedad del ambiente también será relevante en el dimensionamiento de los lechos de secado.

En resumen, las variables ambientales van a condicionar el dimensionamiento de los diferentes procesos y cuando se trata de condiciones muy determinantes, condicionarán de manera importante las ponderaciones de los criterios de valoración e, incluso, puede ser factores limitantes.

I.7 CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO DE LA PTAR

Como se ha visto a lo largo de todo el documento, las características del predio donde se ubicará la instalación de tratamiento van a condicionar completamente la solución a desarrollar. Para obtener parte de la información esencial es necesario realizar una serie de estudios específicos sobre el terreno.

A pesar de su importancia, en muchas ocasiones estos estudios básicos se realizan justo antes de la redacción del proyecto de construcción, una vez finalizado el análisis de alternativas, lo que supone un claro error en la programación de los trabajos. Esta información es de una importancia trascendental para el estudio de soluciones, dado que determinará los costos de construcción y la forma en que se

puedan disponer los diferentes elementos de proceso, repercutiendo también en los costos de operación (condicionando los bombeos necesarios, por ejemplo). Por tanto, estos estudios deberán realizarse siempre antes de iniciar el estudio de alternativas. Idealmente, incluso, deberían haberse realizado en cada uno de los predios comparados en la selección de terrenos, de tal forma que se asegure una buena selección.

Los estudios previos asociados a estos aspectos consistirán en estudios hidrológicos, geotécnicos, topográficos, visitas al terreno de la PTAR y entrevistas, principalmente con la municipalidad y con el propietario anterior del terreno y con los propietarios o habitantes de los terrenos cercanos.

- **Estudios topográficos.**

- **Cota de llegada del agua al terreno.** Es importante su estimación porque determinará las necesidades de bombeo a la entrada de la instalación. La necesidad o no de un bombeo a la entrada puede condicionar en parte que las alternativas de tratamiento que requieren bombeos intermedios puedan resultar más o menos adecuadas. Esta cota dependerá de la cota de salida de la red de saneamiento y del trazado del emisario que lleva las aguas hasta la PTAR. En ocasiones el bombeo de impulsión se ubica en cabecera del emisario, pero esta opción no siempre es posible o deseable. Si existe la necesidad de implantar un bombeo en cabecera de la instalación, esta circunstancia ya va a requerir por sí sola la necesidad de llevar energía eléctrica a la planta, por lo que este costo no sería imputable a una alternativa en concreto.
- **Topografía del terreno de la PTAR.** Condicionará de manera determinante los costos de implantación y de O&M, e incluso puede llegar a invalidar algunas tecnologías. Por ejemplo, un desnivel excesivo en la parcela podría hacer inviable la construcción de tecnologías extensivas por el alto costo de ejecución del movimiento de tierras. Sin embargo, puede ser especialmente recomendable para filtros percoladores si con ello se evita el bombeo previo.

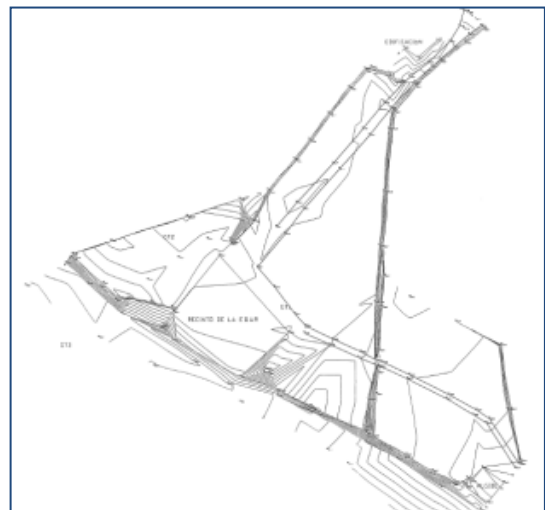


Figura 1.2. Estudios topográficos en el terreno de una PTAR

- **Estudios de inundabilidad.** En el caso de que el riesgo de inundación sea importante, se deberán prever medidas especiales para proteger las instalaciones que podrían encarecer la inversión (diques de protección, elevación y consolidación de los terrenos, etc.), así como el

mantenimiento de las instalaciones, pudiendo variar estas medidas de una alternativa a otra, al depender de la superficie ocupada y de las características constructivas de los diferentes elementos de proceso. Estas medidas podrían modificar la disponibilidad presupuestaria para la ejecución y O&M de la PTAR de un modo importante.

Será necesario consultar los mapas de inundación existentes y, en caso de que no se dispongan, entrevistar a técnicos de la municipalidad por si dispusiesen de información al respecto y evaluar los datos históricos y el registro de fotografías aéreas o de otra información que se disponga para valorar el riesgo de inundación. En situaciones de riesgo elevado deben realizarse estudios hidrológicos e hidráulicos específicos.



Figura 1.3. Imagen de PTAR construida en zona inundable (Google Earth)

▪ Estudios geotécnicos

- **Las características geológicas y geotécnicas del terreno.** El tipo de suelo (arcilloso, rocoso, arenoso...) y su capacidad portante condicionará completamente los costos de movimiento de tierras, de excavación y de cimentación y, en función de las características de los elementos de proceso que compongan una línea de tratamiento, el grado de afección y la repercusión en los costos variará.

Será necesaria la realización de un estudio geotécnico representativo de todo el terreno.

- **Nivel freático.** La presencia de un nivel freático elevado puede tener importantes implicaciones en los costos de implantación de la PTAR, más concretamente en lo referente al soporte y cimentación de estructuras. También puede afectar a la operación y mantenimiento de la PTAR, por ejemplo, generando bolsas de aire bajo la membrana de impermeabilización en lagunas. Las alteraciones que el nivel freático y sus variaciones pueden generar dependerán de cada tecnología, por lo que ha de conocerse en el estudio de alternativas.

Será necesaria la realización de catas o de un estudio geotécnico representativo de todo el terreno. Es sumamente importante que se determine el nivel en la época del año más desfavorable, es decir cuando el nivel freático se encuentre más elevado, así como sus variaciones a lo largo del año.



Figura 1.4. Catas para determinar el nivel freático en el terreno de la planta de Konani en Bolivia

- Condicionantes sobre la disponibilidad del terreno.** Si bien no requieren de un estudio específico, hay aspectos como el costo del terreno de la PTAR, la propiedad del mismo y la estimación de su costo de oportunidad, que será necesario conocer ya que podrían ser condicionantes importantes a la hora de evaluar los requerimientos de superficie y sus implicaciones para las distintas alternativas. La propiedad del predio seleccionado es importante porque, en caso de ser privado, siempre habrá un riesgo de no llegar finalmente a un acuerdo y tener que cambiarlo, lo que puede tener importantes repercusiones sobre la alternativa más adecuada, así como sobre la disponibilidad presupuestaria para la inversión y para la O&M. El costo de oportunidad es relevante porque, en el caso de que este sea elevado, introducirá un factor a considerar en el estudio de alternativas, para reducir en la medida de lo posible la superficie ocupada por la PTAR.

Para conocer esta información será necesario entrevistarse con los técnicos responsables de la municipalidad.

- Identificación de las posibilidades de vuelco del vertido.** La selección del medio receptor del vertido es importante porque puede condicionar los objetivos de tratamiento, pero también lo es la distancia desde el terreno de la PTAR al punto de vertido puesto que, de encontrarse muy alejado, la construcción del emisario de vertido podría limitar la disponibilidad presupuestaria prevista para la PTAR.

Para el grado de detalle requerido en el estudio de alternativas puede ser suficiente la realización de medidas sobre imágenes aéreas como Google Earth o alguna otra aplicación de calidad reconocida.

La existencia de un punto de vertido cercano debería ser un requisito en la selección de los terrenos de la PTAR. Cuando no existe, a veces se plantea para pequeñas poblaciones la solución de infiltrar en el terreno, lo que se desaconseja porque suele terminar en un fracaso, inundando terrenos colindantes y generando cursos de agua artificiales por los que desagua el vertido. La infiltración en terreno, en general, requiere de mucha superficie, con características muy adecuadas de infiltración y de distancia al nivel freático, que además debe utilizarse de manera intermitente y requiere de muy buena calidad de salida en el agua y de una operación permanente, actuando sobre el terreno en reposo.

En los casos en los que se pretenda el reúso del agua tratada es fundamental prever la construcción de un depósito o balsa posterior a la instalación donde se almacene el agua regenerada y puedan captar los diferentes usuarios. No se debe permitir que se extraigan las

aguas de los procesos de tratamiento (lagunas de tratamiento), porque se estaría alterando el proceso depurativo, reduciendo significativamente los tiempos de retención necesarios para lograr un tratamiento eficaz

- **Accesos a la red eléctrica y a la red de agua potable.** En caso de no contar con un acceso cercano se deberá disponer de fondos adicionales para, o bien los enganches a red, o bien la infraestructura para obtener los recursos autónomamente (pozos o generación de energía para autoconsumo). Esto, desde la perspectiva de la inversión podría reducir significativamente la disponibilidad presupuestaria y desde la perspectiva de la O&M podría condicionar la selección de las alternativas de tratamiento.

Para conocer esta información será necesario entrevistarse con los técnicos competentes al respecto de la municipalidad, realizar visitas a campo y evaluar los costos en el caso de que sean requeridas infraestructuras adicionales.

Como se ha visto, la influencia del terreno de la PTAR (ubicación y características) es de tal magnitud que, si no está definido, hacer una selección de alternativas no tendrá razón de ser. La información del terreno se utilizará principalmente para realizar los prediseños necesarios y estimación de costos, pero también en el establecimiento de criterios limitantes y en la ponderación de los criterios de valoración. Debido a la gran importancia que tiene la selección de los terrenos y a que no siempre se le presta la atención necesaria, se está elaborando una guía específica por parte del CEDEX la AECID donde se establecen una serie de recomendaciones para su estudio y selección.

I.8 CONOCIMIENTO DE PRECIOS LOCALES

Tanto en los costos de construcción como en los de operación y mantenimiento los precios locales tendrán una repercusión muy importante y su conocimiento, al menos de las partidas que más los condicionen, será necesario para poder estimar estos costos a partir de los prediseños a realizar en las líneas de tratamientos seleccionadas.

A continuación se exponen algunas de las partidas más importantes:

- **Costos de construcción:**
 - **Partidas de obra civil:**
 - Excavación y movimientos de tierra
 - Hormigón
 - Acero
 - Encofrado
 - Geomembranas
 - Cerramiento
 - **Equipos electromecánicos:**
 - Válvulas y compuertas
 - Bombas
 - Rejas y tamices automatizados
 - Equipos de aireación
 - Equipamiento eléctrico
 - Instrumentación
 - **Materiales especiales:**
 - Relleno de arena (filtros de arena)
 - Relleno de piedra (humedales y filtros percoladores)

- Relleno de plástico (filtros percoladores)

Es importante que los precios unitarios de estas partidas, tanto de obra civil como de equipos electromecánicos, consideren no solamente el material o el equipo, sino también el de la mano de obra asociada para su instalación en terreno.

- **Costos de operación y mantenimiento**

- Sueldos locales de las distintas especializaciones requeridas
- Precio de la electricidad
- Precio del transporte y de la disposición de lodos para las distintas opciones viables
- Precio de los reactivos empleados puestos en la instalación.
- Costo de toma de muestras y análisis requeridos
- Costo de reparaciones y reposiciones de equipos y elementos singulares

ANEXO II: CONOCIMIENTO DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO

CONTENIDOS DEL ANEXO II

II.1	GENERALIDADES	138
II.2	TIPOLOGÍAS DE TRATAMIENTO EXISTENTES	138
II.3	CONFORMACIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO	143
II.4	CARACTERÍSTICAS DE LAS ALTERNATIVAS A COMPARAR	145
II.5	OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE LOS ATRIBUTOS	150
II.5.1	PREDISEÑO DE LAS ALTERNATIVAS	150
II.5.2	OTROS PROCEDIMIENTOS PARA INTEGRAR LA INFORMACIÓN	153
II.5.3	UTILIZACIÓN DE VALORES TIPO DE LA BIBLIOGRAFÍA	153

II.1 GENERALIDADES

Tanto para poder realizar una propuesta de alternativas a valorar como para su posterior estudio, es imprescindible tener un profundo conocimiento de las tecnologías de tratamiento, que abarque todas sus características fundamentales. Como muestra la Figura II.1, el conocimiento de las características de las tecnologías de tratamiento va a ser necesario para la selección de líneas de tratamiento, para la realización de los prediseños y para la valoración de las líneas de tratamiento.

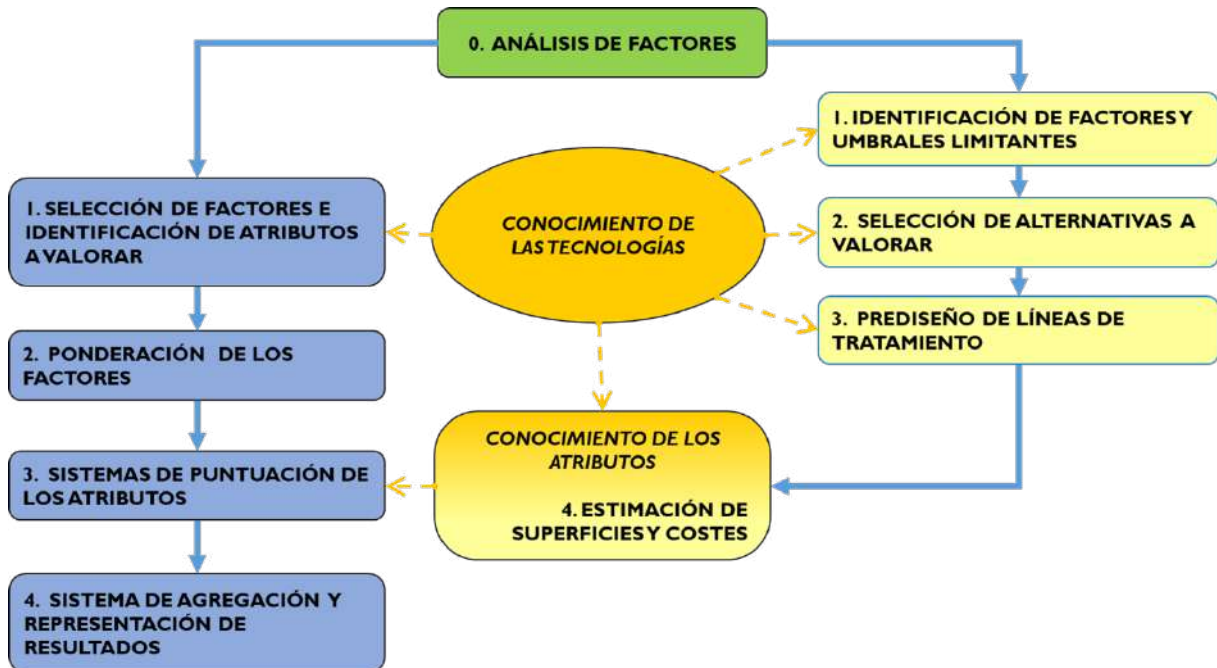


Figura II.1. Influencia del conocimiento de tecnologías en el proceso de selección

En concreto, en la etapa de selección de líneas de tratamiento se necesita conocer las características de los diferentes procesos y líneas de tratamiento para determinar qué alternativas cumplen con los factores limitantes y cuáles no. Para la valoración de las alternativas seleccionadas será necesario conocer los atributos de las tecnologías de tratamiento que permitan puntuar cada factor de valoración. Para poder determinar alguno de estos atributos de una manera suficientemente precisa, será necesaria la realización del prediseño de las alternativas, por lo que se deberán conocer los fundamentos de los procesos de tratamiento y los procedimientos de diseño más adecuados en función del contexto existente.

En los siguientes apartados se analizan los aspectos específicos requeridos de este conocimiento.

II.2 TIPOLOGÍAS DE TRATAMIENTO EXISTENTES

El número de soluciones que podría ser tenido en cuenta en un estudio de alternativas de tratamiento es mucho mayor que para otro tipo de decisiones, puesto que existen multitud de procesos de tratamiento diferentes para las diversas etapas de la línea de agua o de la línea de lodos, y sus combinaciones permiten definir infinidad de trenes de tratamiento diferentes, cada uno con sus ventajas y desventajas. El conocimiento de los técnicos que realizan un estudio de alternativas debería ser lo más amplio posible para poder identificar y proponer alternativas que pudieran ser adecuadas en las condiciones del problema concreto.

Las siguientes tablas incluyen una relación de los procesos que se pueden encontrar más comúnmente tanto en la línea de aguas como en la de lodos, lo que da una idea de la gran diversidad de trenes de tratamiento por los que se podrá optar combinando los diferentes elementos.

Tabla II.1. Procesos unitarios que se pueden encontrar con más frecuencia en la línea de aguas de una PTAR

GRUPO	PROCESOS O UNIDADES DE TRATAMIENTO		OBSERVACIONES
PRETRATAMIENTOS	Pozo de gruesos Desbaste (rejas de gruesos y de finos y tamices) Desarenado Desengrasado Desarenado-desengrasado conjunto		Hay sistemas manuales y mecanizados Requieren en muchos casos de equipos auxiliares para transporte y lavado de los residuos
	Homogenización y Regulación de Caudales Preaireación Homogeneización de pH		Acondicionamiento de caudales y cargas contaminantes
TRATAMIENTOS PRIMARIOS	Decantación Físico-Químico con decantación Físico-Químico con Flotación		
	Tanques Sépticos (fosas sépticas) Tanques multicámara Decantadores-Digestores (Tanque Imhoff)		Estabilizan el lodo
PROCESOS ANAEROBIOS	Manto de lodos	Reactores anaerobios de flujo ascendente: RAFA RALF	Estabilizan el lodo
	Lecho fijo	Filtro anaerobio de flujo ascendente: FAFA	Estabiliza el lodo
TRATAMIENTOS SECUNDARIOS INTENSIVOS		Condiciones de funcionamiento: Alta Carga Media Carga Aireación Extendida	En aireación extendida se estabiliza el lodo
	Lodos Activados	Configuración de reactores Doble Etapa Cubas convencionales Contacto-Estabilización Canales o zanjas de oxidación	Requieren decantación secundaria después de los reactores biológicos Existen diferentes sistemas de aireación aplicables
		Sistemas Secuenciales	Decantación en el mismo reactor
		Biorreactores de Membranas	Diferentes tipos de sistemas de membranas para separar agua del lodo

GRUPO	PROCESOS O UNIDADES DE TRATAMIENTO		OBSERVACIONES
	Lodo aerobio granular	NEREDA	Requieren decantación
	Procesos de Película Fija	Filtros percoladores Biodiscos y biocilindros Sistemas de Biomasa Fija sobre Lecho Móvil Lechos Aireados Sumergidos	Requieren decantación
		Biofiltros Aireados	No requieren decantación. Los lodos se extraen con el lavado de los filtros
	Mixtos de lodos activos y biopelícula	IFAS	
TRATAMIENTOS SECUNDARIOS EXTENSIVOS O BASADOS EN LA NATURALEZA	Lagunas de estabilización	Lagunas Anaerobias Lagunas Facultativas Lagunas Maduración Lagunas Aireadas	En los sistemas de lagunaje se estabiliza el lodo y se desinfecta Las lagunas aireadas son semi extensivas
	Humedales artificiales	Humedales verticales Humedales horizontales subsuperficiales Humedales horizontales superficiales	El lodo generado es poco y estabilizado y se acumula en los reactores Los horizontales superficiales desinfectan
	Macrófitos en flotación Filtros intermitentes de arena Lechos o filtros de turba Escorrentía sobre el terreno Filtros verdes		Lodos se acumulan en los procesos estabilizándose. Se obtiene una desinfección en diferente grado
	Lombrifiltros		Sistema natural de baja superficie Lodo estabilizado (humus)
TRATAMIENTOS SECUNDARIOS AVANZADOS	Procesos de película fija	Reducción de amonio (Nitrificación) Remoción de nitrógeno	
	Lodos activados	Nitrificación Remoción de nitrógeno Remoción de fósforo Remoción de nitrógeno y fósforo	Compatibles con media carga y aireación extendida
	Físico – químico	Remoción de fósforo pre-, post- o en coprecipitación con el biológico	Genera más lodos
		Remoción de fósforo por flotación	

GRUPO	PROCESOS O UNIDADES DE TRATAMIENTO	OBSERVACIONES	
TRATAMIENTOS TERCIARIOS Y CUATERNARIOS	Remoción de DBO ₅ y SS	Tratamiento Físicoquímico Filtración Microfiltración Ultrafiltración	
	Desinfección	Oxidantes: Cloro Gas Hipoclorito Sódico Dióxido de Cloro Ozono Rayos Ultravioleta Físicos: Microfiltración Ultrafiltración Ósmosis Inversa	Hay sistemas extensivos que también desinfectan
	Remoción de sales	Ósmosis Inversa Electrodialisis Reversible Intercambio Iónico	
	Remoción de microcontaminantes	Ozono Carbón activo	



Figura II.2. Planta de tratamiento de Campos do Jordão con sistema MBR, Sao Paulo, Brasil



Figura II.3. Planta de tratamiento con lagunaje en Mendoza, Argentina

Tabla II.2. Procesos unitarios más frecuentes en la línea de lodos de una PTAR

GRUPO	OBJETO	PROCESO
ESPESAMIENTO	Reducción de la cantidad de agua	Por gravedad Por Flotación Tambores Rotativos Mesas espesadoras Centrífugas
ACONDICIONAMIENTO PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	Evitar atascos en digestores	Tamizado
	Hidrólisis de las moléculas complejas para facilitar la digestión	Térmica Química Por ultrasonidos
ESTABILIZACIÓN	Digestión Anaerobia	A temperatura ambiente Mesófila Termófila
	Estabilización Aerobia	Mesófila Termófila
	Estabilización Química	Dosificación de cal
ACONDICIONAMIENTO PARA DESHIDRATACIÓN	Mejora cualidades para su secado	Químico Térmico
DESHIDRATACIÓN	Reducción del contenido en agua	Filtros Banda Centrífugas Filtros Prensa Lechos de Secado
SECADO	Reducción del contenido en agua e higienización	Secado Solar Secado térmico
INCINERACIÓN	Reducción del volumen, estabilización, aprovechamiento energético	Combustión completa, generalmente precedida de secado térmico
ACONDICIONAMIENTO PARA AGRICULTURA	Higienización y mejora de las condiciones	Compostaje



Figura II.4. Secado solar de lodos en la PTAR de Managua, Nicaragua

En estas tablas se han incluido únicamente las tecnologías más comunes y que cuentan con un grado de consolidación suficiente, pero se podrían añadir otros muchos tratamientos más novedosos y que todavía cuentan con poca experiencia contrastada. El sector del tratamiento de aguas es tremendamente innovador y continuamente están surgiendo nuevos procesos o modificaciones de los existentes que permiten mejoras en diferentes situaciones.

Singularidades de las pequeñas poblaciones

Por sus características específicas, va a ser en los proyectos en pequeñas poblaciones donde es todavía más importante realizar un estudio de alternativas riguroso. Las pequeñas poblaciones habitualmente disponen de una mayor superficie en términos relativos para la implantación de la PTAR, lo que hace viable la utilización de tecnologías extensivas e intensivas. Esto supone que el abanico de tecnologías posibles aumenta significativamente y, por lo tanto, aumenta también la complejidad del estudio de alternativas, haciéndolo aún más necesario.

La economía de escala es muy marcada en la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento, por lo que, en general, en pequeñas poblaciones se debería optar por tecnologías que tengan pocos requerimientos de operación y mantenimiento, siendo por ello las tecnologías extensivas las más adecuadas. En estos casos, además de procurar una tecnología lo más sostenible posible desde el punto de vista técnico y económico, se debe asegurar que están desarrolladas adecuadamente los otros elementos del servicio, las capacidades del operador y el compromiso de la población con el proyecto.

Es habitual y deseable, para superar el hándicap impuesto por la economía de escala, que se consideren sistemas de gestión supramunicipal, donde dos o más núcleos poblacionales se unen para gestionar conjuntamente el sistema de saneamiento y tratamiento.

II.3 CONFORMACIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRATAMIENTO

Las líneas de tratamiento comprenden una serie de procesos unitarios que conforman las distintas etapas de la PTAR, empezando por el pretratamiento y seguido generalmente por un tratamiento primario y un secundario. Además, completando la línea de agua, debería preverse una cadena de tratamientos de lodos que consiga obtener las condiciones requeridas de estabilización y sequedad

para su adecuada disposición. Este tipo de líneas más clásicas no siempre se cumple puesto que la diversidad de tratamientos existente permite otro tipo de configuraciones. Un ejemplo muy claro sería el tratamiento con aireación extendida, donde después del pretratamiento el agua pasa directamente a un tratamiento secundario donde, además, también se estabiliza el lodo.

El primer paso de la metodología consistirá en identificar una relación de líneas de tratamiento que podrían ser adecuadas para el contexto concreto que se va a analizar. Para hacerlo, primeramente, de todas las tecnologías de tratamiento disponibles se seleccionarán aquellas correspondientes al tratamiento primario o secundario que, a priori, podrían ser adecuadas para el proyecto que se está considerando. A partir de ellas se construirán las líneas de tratamiento que se consideren viables. Por ejemplo, si una de las tecnologías adecuada a priori son los filtros percoladores se podrían plantear dos líneas de tratamiento diferentes, como se muestra en las siguientes figuras.

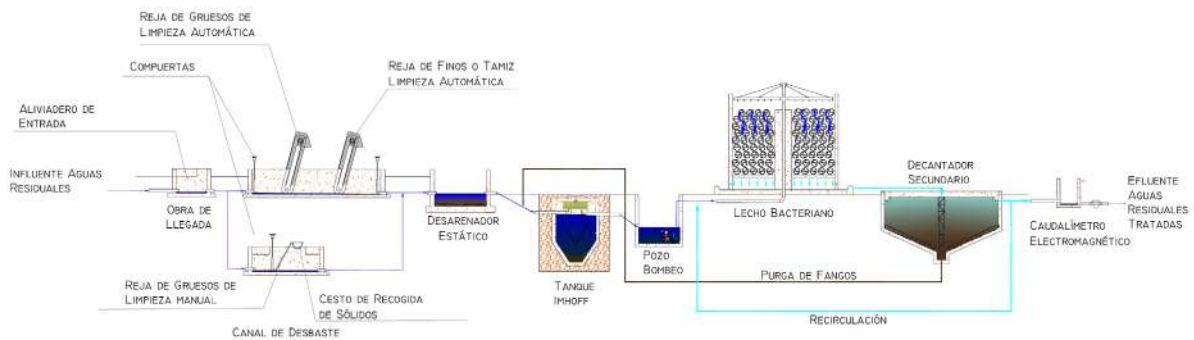


Figura II.5. Línea de tratamiento de Filtros Percoladores con Tanque Imhoff en cabecera (MARM, 2010)

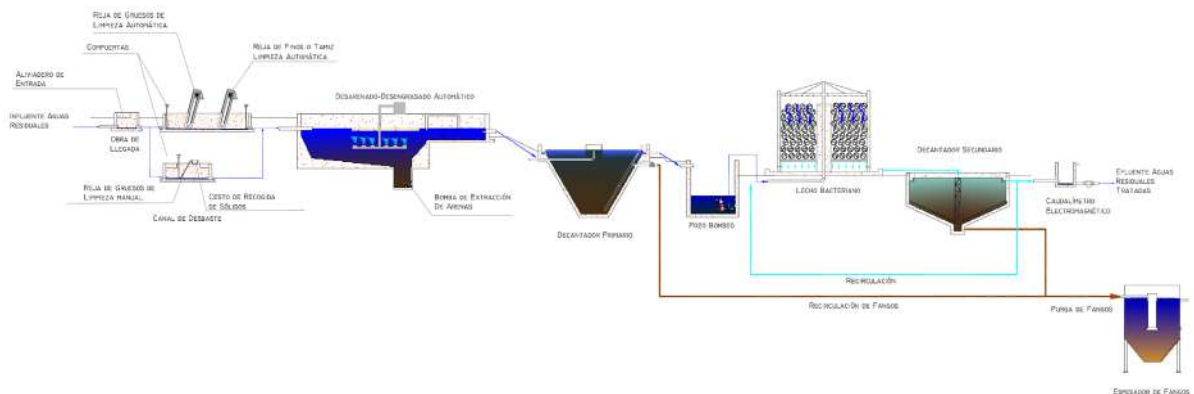


Figura II.6. Línea de tratamiento de Filtros Percoladores con Decantación Primaria en cabecera (MARM, 2010)

Cuando se planteen las líneas de tratamiento, se debe tener en cuenta que siempre se han de adaptar a los condicionantes locales. Incluso, para hacer frente a algunos factores se pueden dotar de elementos auxiliares o de etapas de proceso adicionales que les permitan mejorar ciertas características. Este sería el caso de prever un cerramiento de las instalaciones y su desodorización o de incluir tanques de laminación de caudales o de neutralización del pH en cabecera.

La normativa de todos los países, en general, impone restricciones a la materia orgánica y a los sólidos en suspensión en las descargas de las poblaciones y requiere que el nivel de tratamiento que se deba alcanzar en la mayor parte de las PTAR sea el de un secundario, siendo en algunos casos más estricta que en otros. En algunos países además se imponen también limitaciones a los nutrientes (nitrógeno y/o fósforo) y a los patógenos (coliformes totales y/o fecales). Las normas de reúso normalmente

siempre van a exigir la desinfección de las aguas hasta un nivel que dependerá del tipo de uso. La eliminación de nutrientes en algunos casos se realiza juntamente con el tratamiento secundario y en otros como un terciario adicional. Respecto a la desinfección de las aguas, hay tratamientos extensivos que permiten alcanzar cierto grado de reducción de patógenos, pero en la mayor parte de tratamientos intensivos se deberá añadir un tratamiento terciario. Recientemente, en los países más desarrollados y para las instalaciones de mayor tamaño, se está empezando a añadir un tratamiento cuaternario para la reducción de los microcontaminantes.

Aunque para algunos factores la idoneidad de adaptación a las condiciones locales deberá evaluarse para cada tecnología o proceso unitario, en otros muchos aspectos trascienden el alcance de una tecnología concreta y es más adecuado evaluarlo a nivel de la línea de tratamiento completa. El ejemplo más claro sería el de los rendimientos exigidos para el vuelco del efluente o para la disposición de lodos, que serán alcanzados con toda la línea. Además, el rendimiento global no es algo que se pueda estimar a partir de la suma lineal de lo que se obtiene con cada proceso unitario, puesto que el rendimiento alcanzado en cada etapa va a depender de las condiciones en las que llega el agua o el lodo de las etapas anteriores. Otro tipo de caso que evidencia la necesidad de evaluar líneas completas se da cuando un proceso unitario podría ser poco adecuado por un condicionante determinado, pero otro elemento de proceso incluido en la línea compensa esa limitación. Por ejemplo, si existen variaciones de caudal bruscas, un filtro percolador sin recirculación no lo soportaría bien y en una evaluación por tecnología el resultado sería que no es una tecnología adecuada para contextos con fuertes variaciones de caudal. Sin embargo, si el filtro percolador estuviera precedido en la línea de tratamiento por una laguna anaerobia, que puede tener un tiempo de retención de dos días, se elimina cualquier posible afección al respecto en el filtro percolador. De este modo, la evaluación a nivel línea de tratamiento daría como resultado que la línea de tratamiento es muy adecuada para contextos en que las variaciones de caudal sean acusadas.

Cuando es necesario incluir un proceso terciario de desinfección o un cuaternario, el análisis de estas partes del tratamiento, por su especificidad, en algunas ocasiones sí pueden abordarse de manera separada al resto de la línea, de tal forma que por una parte se puede analizar las alternativas hasta el tratamiento secundario y por otra las alternativas de terciario o cuaternario.

II.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS ALTERNATIVAS A COMPARAR

Para evaluar la adaptación de las líneas de tratamiento a los diferentes factores, será necesario identificar una serie de atributos a valorar, algunos de los cuales serán generales de la tecnología y se mantendrán en los mismos rangos en todos los casos, independientemente del contexto local, mientras que otros pueden variar sensiblemente con las condiciones locales, por lo que se deberán realizar estudios para determinarlos en cada caso. Tanto para unos como para otros, se requiere un conocimiento profundo de las características de las diferentes tecnologías de tratamiento. A partir de los valores de estos atributos y por comparación con el resto de las líneas de tratamiento analizadas, será posible realizar una valoración fundada y consistente de cada factor.

En la tabla siguiente se identifican las características que será necesario conocer para poder valorar las alternativas de tratamiento con respecto a diferentes factores.

Tabla II.3. Conocimiento necesario de las líneas de tratamiento para valorar los factores

Factores	Conocimiento de las líneas de tratamiento
A. CONDICIONANTES DEL TRATAMIENTO	
BASES DE PARTIDA	
1. Calidad a obtener en el efluente a partir de las características de entrada	<p>Rendimientos en eliminación obtenidos en los diferentes procesos y por las líneas de tratamiento para los distintos parámetros a considerar.</p> <p>Necesidad de considerarlo en el predimensionamiento adaptado a las condiciones locales.</p>
2. Requisitos impuestos sobre los lodos	<p>Niveles de sequedad, estabilización e higienización obtenidos con los diferentes tratamientos.</p> <p>Posibilidad de mejorar el factor con procesos adicionales de secado o compostaje. Repercutirá en los costos de construcción y operación.</p>
2. Características del agua residual a tratar (concentración de contaminantes)	<p>Capacidad de adaptación a distintos tipos de agua residual (concentrada, diluida...).</p> <p>Capacidad de adaptación a la entrada de tóxicos.</p> <p>Posibilidad de mejorar el factor introduciendo nuevos elementos de proceso en la línea asociados a la homogenización y regulación de caudales o el acondicionamiento del efluente, por ejemplo ajustando el pH. Repercutirá en los costos de construcción y operación.</p>
3. Variaciones de caudal y carga	<p>Capacidad de adaptación a variaciones de caudal y carga mayores a las habituales.</p> <p>Consideración tanto por elementos de proceso como por líneas completas.</p> <p>Posibilidad de mejorar el factor introduciendo elementos de regulación y modulación en los bombeos. Repercutirá en los costos de construcción.</p>
CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES	
1. Temperatura	<p>Rango de temperatura en el que es viable el proceso.</p> <p>Variaciones en dimensiones, rendimiento y requerimientos de cada tratamiento. Necesidad de considerar esta variable en el predimensionamiento adaptado a las condiciones locales.</p>
2. Pluviometría	<p>Rango pluviométrico que haría poco recomendable el proceso.</p> <p>Posibilidad de introducir elementos para contrarrestar su influencia (cubierta en los lechos de secado). Repercutirá en los costos de construcción.</p>
3. Altitud	<p>Rango de altitud que haría poco recomendable el proceso.</p> <p>Variaciones en requerimientos del proceso. Necesidad de considerar esta variable en el prediseño adaptado a las condiciones locales.</p>
B. TERRENO DISPONIBLE	
1. Superficie disponible	Superficie de implantación requerida obtenida a partir del predimensionamiento de las instalaciones.

Factores	Conocimiento de las líneas de tratamiento
	<p>La superficie ocupada será la necesaria para todos los elementos de proceso, los elementos intermedios de conexión y reparto de caudales, las instalaciones auxiliares de los procesos de tratamiento (edificio de soplantes en lodos activados, por ejemplo o de reactivos en una precipitación química de fósforo), edificios de control, personal, taller y, en su caso, laboratorio, edificios de equipos eléctricos e instalaciones auxiliares de la instalación, viales de acceso a todas las unidades de proceso, zonas de maniobra de vehículos pesados, etc.</p> <p>La superficie ocupada es también un elemento determinante para el costo de protección contra inundaciones.</p>
2. Características constructivas del terreno	<p>Condicionantes constructivos de la tecnología. Configuración típica de los reactores de proceso (cargas, alturas, superficies y profundidades).</p> <p>Probablemente podrá traducirse cualquier adaptación a costos de construcción y operación, por lo que debería tenerse en cuenta en el prediseño adaptado a las condiciones locales.</p>
C. IMPACTOS AMBIENTALES	
1. Riesgo de emisión de ruidos. La potencialidad del impacto determinará el peso del factor	<p>Nivel de ruidos emitido. Tipo y número de equipos requeridos.</p> <p>Posibilidad de introducir elementos para mejorar el factor, como instalar las soplantes en un edificio insonorizado. Repercutirá en costos de construcción.</p>
2. Riesgo de generación de olores	<p>Nivel de olores producidos, tanto con una adecuada como con una inadecuada operación.</p> <p>Posibilidad de introducir medidas para mejorar el factor como cubrir los elementos más problemáticos y desodorizar. Incluso se puede cubrir toda la planta de tratamiento. Repercutirá en costos de construcción y de operación.</p>
3. Impacto visual	<p>Dimensión de los reactores y cubas (altura de los elementos de proceso) y aspecto (artificial o natural) y configuración del proceso.</p> <p>Posibilidad de introducir elementos para mejorar la estética, incluida la cubrición de elementos. Repercutirá en costos de construcción.</p>
4. Emisiones de gases de efecto invernadero	<p>Emisiones potenciales de GEI (metano, N₂O y CO₂ de origen no biogénico). Necesario conocer el consumo energético y el origen de dicha energía. Es necesario realizar un prediseño para valorarlo adecuadamente.</p> <p>Posibilidad de introducir elementos para evitar el escape de metano (captación del biogás y quemado en antorcha). Repercusión en costos de construcción y de operación.</p>
D. ECONOMÍA CIRCULAR	
1. Gestión y valorización de lodos	<p>Cantidad y calidad de lodos generada (sequedad, estabilidad e higienización) y frecuencia requerida de retirada de lodos.</p> <p>Podrán completarse las líneas de lodos para llegar a los requisitos de cada caso. Repercusión en costos de construcción y de operación.</p>

Factores	Conocimiento de las líneas de tratamiento
2. Requerimientos de reúso del agua	<p>Aptitud del efluente obtenido para su regeneración: niveles de patógenos y de sólidos suspendidos alcanzados.</p> <p>Podrán completarse las líneas de agua para llegar a los requisitos de cada caso. Repercusión en costos de construcción y de operación.</p>
3. Requerimientos sobre neutralidad energética	<p>Consumo energético y potencialidad de recuperar energía. Va a depender también de las fuentes de energía primaria utilizadas. Es necesario realizar un prediseño para valorarlo adecuadamente.</p> <p>Posibilidad de mejorar este factor introduciendo elementos en las instalaciones y procedimientos de control en la operación para mejorar la eficiencia en cualquier situación que se pueda esperar. Repercusión en costos de construcción y operación y en complejidad de operación.</p>
4. Requerimientos de recuperación de subproductos	<p>Posibilidad de recuperación de estruvita en el lodo generado.</p> <p>Podrán completarse las líneas de lodos para este fin..</p> <p>Repercusión en costos de construcción y de operación.</p>

E. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

1. Complejidad de O&M	<p>Singularidad de los equipos y de su mantenimiento.</p> <p>Singularidad de los sistemas de control para asegurar un funcionamiento eficaz y eficiente de los procesos.</p> <p>Requerimientos específicos en cuanto a especialización del personal e instrumentación asociada. Repercusión en costos de operación.</p>
2. Requerimientos de repuestos y servicio técnico	<p>Nivel de equipamiento electromecánico y su complejidad.</p> <p>Fiabilidad de los equipos requeridos por las diferentes tecnologías (nivel de averías).</p> <p>Posibilidad de mejorar este factor previendo equipos de reserva. Repercusión en costos de construcción.</p>

F. COSTOS

1. Costos de construcción	<p>Determinación a partir de los prediseños adaptados a las condiciones locales. Las instalaciones deben incluir todos los elementos considerados bien para lograr los objetivos definidos o, si se considera oportuno, para mejorar algunos de los factores descritos anteriormente.</p> <p>Además de las líneas de tratamiento, deben incluirse todos los elementos e instalaciones auxiliares, así como edificios de control, taller, almacén, reactivos y personal, la urbanización con viales y zonas de maniobra de vehículos y el cerramiento del terreno.</p> <p>Todo ello estará fuertemente condicionado por la ubicación y as características del terreno.</p> <p>Será necesario estimar mediciones y costos de los principales elementos de la obra, tanto en obra civil como en equipos electromecánicos, para lo que se deberá conocer los precios unitarios locales de las principales partidas.</p>
---------------------------	---

Factores	Conocimiento de las líneas de tratamiento
2. Costos de O&M	<p>Determinación a partir de los prediseños resultantes de todos los condicionantes.</p> <p>Para su estimación será necesario conocer la intensidad de las distintas partidas correspondientes a la operación y mantenimiento y los precios unitarios locales asociados. Estas partidas serán al menos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Necesidades de personal, dependiente de: necesidades de control y de operación de las instalaciones y de mantenimientos requeridos en las instalaciones (desde mantenimiento preventivo de equipos electromecánicos hasta la siega del exceso de vegetación en humedales). Dependiendo del costo y disponibilidad del personal hay actividades que podrán preverse manuales o automatizadas. • Mantenimiento externo especializado requerido para equipos singulares (puesta en marcha, calibración, reparación, revisión de la programación, etc.) • Consumo energético • Producción de lodos y sus características • Consumo de reactivos • Analítica necesaria para el control <p>Estas partidas estarán condicionadas básicamente por el tamaño de las instalaciones. Será necesario conocer los precios unitarios locales de las principales partidas, así como la distancia a transportar los lodos y el costo de disposición para estimar el costo.</p>

En este texto no se pueden describir todas las líneas que se pueden llegar a configurar, ni explicar los fundamentos y características de todos los procesos unitarios de tratamiento, ni las ventajas y desventajas de cada línea, pues supondría un trabajo demasiado extenso que excedería claramente el objetivo de esta monografía. Existe gran diversidad de guías y manuales de tratamiento de aguas residuales donde el lector puede encontrar para cada tecnología o para cada línea de tratamiento las características más importantes y los procedimientos de diseño recomendados. Algunas de las que podrían recomendarse para el contexto latinoamericano serían las siguientes:

- Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions (Von Sperling, Marcos; De Lemos Chernicharo, 2005)
- Manual para la Implantación de Sistemas de Depuración en Pequeñas Poblaciones (MARM, 2010)
- Recomendaciones para la Selección de Tratamientos de Depuración de Aguas Residuales Urbanas en la República de El Salvador (MARN, 2016)
- Tratamiento Biológico de Aguas Residuales: Principios, Modelación y Diseño (Amy et al., 2017)
- Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales (MMAyA, 2021)

Para este trabajo interesarán especialmente las guías donde se analicen de manera específica los aspectos que más pueden diferenciar unas alternativas de otras. Al respecto, se debe tener en cuenta que, en el caso de que la información sobre las características esté disponible únicamente por tecnología, habría que interpretarla y agregarla para poder generar la información necesaria sobre cada línea de tratamiento considerada.

De las guías que aquí se recomiendan, en las tres desarrolladas por el CEDEX y el CENTA, además de explicarse diferentes tecnologías, uno de sus objetivos siempre ha sido que se puedan comparar fácilmente las diferentes opciones de líneas de tratamiento. De todas ellas se podría destacar guía boliviana (MMAyA, 2021), realizada con el apoyo de la AECID, el BID, el CENTA y el CEDEX, por ser la más reciente y exhaustiva, acumulando las experiencias y conocimientos de textos anteriores. Esta guía presenta además la ventaja de que las diferentes tecnologías han sido estudiadas para contextos muy diferentes, puesto que abarca las tres zonas ecológicas predominantes en Bolivia y situaciones socioeconómicas muy diversas.

II.5 OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE LOS ATRIBUTOS

Para cada uno de los factores a valorar debería contarse con al menos un atributo de las líneas de tratamiento que pudiera medirse y valorarse comparativamente. En el capítulo 5 del texto principal se muestra que estos atributos pueden ser de muy diverso tipo y su medición puede ser tanto cualitativa como cuantitativa. En este apartado se incluyen algunas recomendaciones sobre cómo obtener y procesar la información de diversos factores, pero no se entra en el detalle de mostrar sistemáticamente los atributos de cada factor puesto que este detalle se incluye en el capítulo 6.

Dependiendo de la disponibilidad de recursos, de tiempo y de conocimientos, se pueden seguir diferentes métodos para determinar las características de las alternativas a valorar. Para algunos atributos será imprescindible realizar estudios específicos para conocer su comportamiento en las condiciones locales, mientras que para otros esta estimación puede resultar muy compleja y con un grado de incertidumbre muy elevado, por lo que podrá recurrirse a calificaciones tipo de la tecnología obtenida de publicaciones especializadas.

En las etapas previas del estudio, para proponer una lista inicial de alternativas y para la preselección en función de los criterios limitantes, puesto que no es posible realizar un estudio en profundidad de todas las líneas existentes, pueden emplearse tablas y curvas de carácter general, pero para realizar una adecuada valoración de las alternativas seleccionadas se debería tratar de realizar un prediseño de cada una de ellas adaptado a las circunstancias locales. En general, el estudio de alternativas será más robusto cuanto más ajustadamente a las condiciones locales se estimen los atributos.

En todo caso y sea cual sea el método de obtención de la información, es muy importante que los atributos estén medidos de manera homogénea para todas las alternativas para evitar introducir un sesgo en la valoración.

II.5.1 Prediseño de las alternativas

Muchas de las características de las tecnologías o de las líneas de tratamiento van a variar muy sustancialmente de un lugar a otro. Las dimensiones de la instalación en cada caso no van a depender solo de los habitantes servidos, sino también de las dotaciones de caudal que consuman y de las cargas contaminantes que generen y de todas las demás entradas de caudales y cargas contaminantes a la red de saneamiento, así como de las condiciones ambientales.

El dimensionamiento de una línea constituye la mejor forma de integrar el efecto de muchos de los condicionantes locales (bases de partida y variables ambientales) que van a determinar el tamaño de los elementos de proceso y de los equipos necesarios. A partir del dimensionamiento de los principales elementos se podrá realizar un prediseño de la instalación completa, teniendo en cuenta otros condicionantes como las características del terreno, y se podrán estimar valores más realistas de otros

factores. Estos diseños no tienen por qué ser exhaustivos en todos los detalles; tan solo han de llegar al nivel requerido para poder estimar con cierto grado de precisión los atributos más determinantes de la tecnología. Por ello en este texto se les denomina prediseños o diseños básicos.

El diseño, aunque básico, deberá realizarse de un modo riguroso y con el mismo rigor metodológico para todas las alternativas, de tal forma que, aunque existan imprecisiones, se puedan comparar en los mismos términos.

Para poder elaborar estos diseños se requiere de un conocimiento elevado de tratamiento de aguas y suficiente de todas las tecnologías incluidas en las líneas de tratamiento que hayan superado el descarte. En el anterior apartado se han recomendado una serie de publicaciones que pueden utilizarse de referencia para conocer los parámetros fundamentales del dimensionamiento de cada tecnología y nuevamente se podría volver a recomendar especialmente la *Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales* (MMAyA, 2021), puesto que incluye procedimientos de diseño adecuados para el estado del arte actual para líneas de tratamiento basadas en ocho tecnologías (FAFA, RAFA, lagunajes, humedales, lombrifiltros, filtros percoladores, contactores biológicos rotativos y lodos activos en su tipología de aireación extendida) y para la diversidad de condiciones ambientales de Bolivia, que representarían gran parte de los contextos que se podrían encontrar en Latinoamérica en general.

Pero, además, como complemento a esta publicación, desde el CEDEX se ha venido trabajando durante varios años en la generación de herramientas de diseño de procesos de tratamiento, específicamente orientadas a obtener la información de los atributos del estudio de alternativas de tratamiento. Dado que estas herramientas pueden ser un apoyo muy útil en los estudios de alternativas, se irán poniendo a disposición pública en la página web de la AECID y del CEDEX, según se vayan finalizando, para su libre descarga y utilización.

Los procedimientos de dimensionamiento se han desarrollado sobre el software Excel de Microsoft por entender que es la herramienta de cálculo más difundida y permitirán, a partir de la introducción de las bases de partida y de las condiciones ambientales locales, obtener los diseños básicos de las tecnologías y procesos unitarios más comunes. A partir de diferentes combinaciones de estos elementos se podrán obtener también los diseños de los trenes de tratamiento completos. Su desarrollo se ha orientado al rango poblacional entre 1.000 y 50.000 habitantes, por entender que es donde puede haber una mayor necesidad de apoyo para realizar los estudios de alternativas. A partir de estos diseños básicos se podrán estimar los valores de atributos fundamentales, como pueden ser la superficie ocupada por la planta de tratamiento, la generación de lodos, los consumos energéticos, los costos de construcción o incluso los costos de operación y mantenimiento.

Estas herramientas, aunque son complementarias de esta publicación, se ponen a disposición de manera separada porque se pretende que se mantengan en revisión continua, adaptándose a la evolución del conocimiento y corrigiéndose y mejorándose a partir de la experiencia en su aplicación. Para ello, en la página web donde se publiquen se habilitará un buzón de sugerencias, de modo que los usuarios puedan enviar las observaciones y correcciones que consideren necesarias, lo que permitirá su mejora continua.

Los elementos de la línea o procesos unitarios cuyas hojas de cálculo de dimensionamiento se encuentran finalizadas en la fecha de redacción de esta guía y que se pondrán a disposición para su descarga son:

- **ENTRADA DE AGUA Y PRETRATAMIENTOS:**
 - Pozo de gruesos estático con aliviadero
 - Aliviadero
 - Cárcamo y equipos de bombeo
 - Canal Parshall
 - Desbaste manual
 - Desbaste automatizado
 - Desarenador estático
 - Desarenador-desengrasador aireado
 - Trampa de grasas
- **TRATAMIENTOS PRIMARIOS**
 - Tanque Imhoff
 - Decantación primaria estática
 - Decantación primaria dinámica
- **TRATAMIENTOS ANAEROBIOS**
 - Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)
- **LODOS ACTIVADOS**
 - Aireación extendida con decantación secundaria estática
 - Aireación extendida con decantación secundaria dinámica
 - Filtro percolador con decantación secundaria estática
 - Filtro percolador con decantación secundaria dinámica
 - Coprecipitación de fósforo
- **TRATAMIENTOS TERCARIOS**
 - Filtración de arena
 - Cloración
- **ESPEZAMIENTO DE LODOS**
 - Espesador dinámico
 - Espesador estático
- **DESHIDRATACIÓN**
 - Lechos de secado

En próximas entregas esta relación de procesos se irá ampliando para incorporar otras líneas de tratamiento muy recurrentes en Latinoamérica, como son las lagunas de estabilización o los humedales artificiales.

Adicionalmente a las hojas de cálculo de cada uno de los procesos unitarios y elaboradas a partir de las anteriores, también se publicarán planillas para una serie de líneas de tratamiento completas, con las cuales se podrán determinar superficies y costos de inversión para la PTAR en su totalidad.

Todas estas planillas pueden tomarse como una referencia y como una ayuda para facilitar los trabajos, pero en ningún caso se deben entender como sustitutivas del conocimiento del proyectista, puesto que, sin un conocimiento profundo sobre tratamiento de aguas y sobre las diferentes tecnologías existentes, muy probablemente se cometerán importantes errores en su aplicación, lo que invalidaría los estudios resultantes.

II.5.2 Otros procedimientos para integrar la información

La información para valorar las alternativas respecto a los diferentes factores se podrá obtener de diferentes atributos. Incluso la información de estos atributos podrá procesarse en mayor o menor grado para integrarla con la información de otros factores. Un ejemplo muy claro se acaba de ver con el prediseño de las instalaciones, pero además de este existen otros sistemas singulares de integrar la información, como puede ser la anualización de costos o la monetización de factores. A continuación se incluyen unas reflexiones y recomendaciones al respecto:

- **Costos anualizados:** Si la entidad que va a operar la instalación es la misma que financia las instalaciones, los costos de construcción, operación y reposición deberían estudiarse conjuntamente dentro del criterio de sostenibilidad económica. Para cada uno de los factores internos del grupo habrá un atributo medible de la tecnología (costos de construcción o costos de operación, por ejemplo) y con el sistema de valoración del factor se tratará de interpretar cómo esos valores registrados de los atributos condicionan la viabilidad económica del proyecto. La mejor forma de integrar todos los costos sería mediante su anualización. En caso de hacerlo así se deberá tener en cuenta no solo la vida útil de los activos adquiridos y los costos financieros asociados, si los hay, sino también el aplicar una tasa de descuento apropiada.
- **Monetización de factores:** En algunos casos es viable integrar algunos de los factores evaluados en los costos y, dependiendo del caso, puede resultar conveniente hacerlo pues simplifica el estudio. De hecho, este es uno de los principales objetivos que se busca con los prediseños, poder realizar una valoración más correcta de los costos de construcción. En el caso de los costos de explotación hay factores, como el consumo energético o la gestión de los lodos que pueden también fácilmente resultar integrados. En el caso de la emisión de gases de efecto invernadero se podría realizar la monetización, transformando todas las emisiones de GEI en su equivalente de CO₂ y aplicando el costo de los derechos de emisión asociados.
- **Costos difíciles de estimar:** Las características del terreno tendrán una influencia muy relevante en las dificultades que se contarán en la construcción de la PTAR. Estas dificultades en la construcción asociadas a las características del terreno podrán evaluarse en el proceso de decisión bien con un factor independiente o bien considerarse específicamente en los prediseños. En esta segunda opción, que es claramente la recomendable, las dificultades de la construcción podrían valorarse en su medida adecuada al estar integradas en los costos de inversión. Sin embargo, en algunos casos estas circunstancias singulares pueden no ser tan fáciles de integrar porque conllevaría realizar un excesivo número de suposiciones sobre los prediseños. Además, estas dificultades constructivas podrían tener otros efectos como una ralentización de las obras, mayores riesgos de paradas prolongadas de las obras, etc., que no solo implicarán mayores costos en la obra, sino que retrasa la puesta en marcha del servicio, todo lo cual resulta difícil de valorar. En esos casos puede ser conveniente mantener estos aspectos como factores independientes y luego valorar los costos en conjunto con esos factores adicionales.

II.5.3 Utilización de valores tipo de la bibliografía

Cuando se trata de atributos que no se puedan medir de forma cuantitativa o que su cuantificación sea excesivamente costosa, y que no varíen sustancialmente con las condiciones locales, podrán tomarse de referencia las guías especializadas. En las figuras siguientes se muestran ejemplos de este tipo de variables.

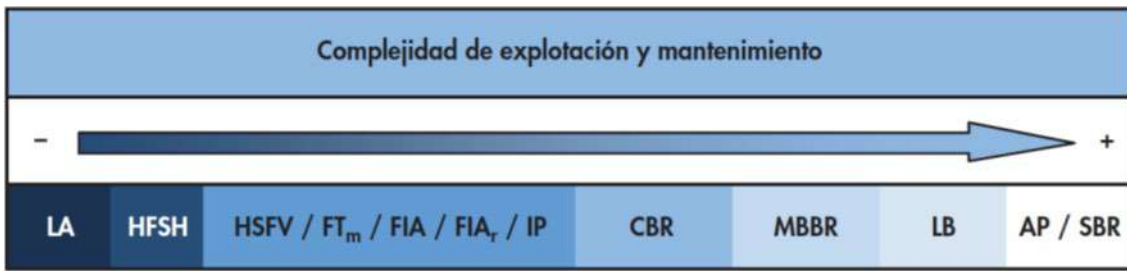


Figura II.7. Clasificación de tecnologías según su complejidad en la explotación y mantenimiento (MARM, 2010)

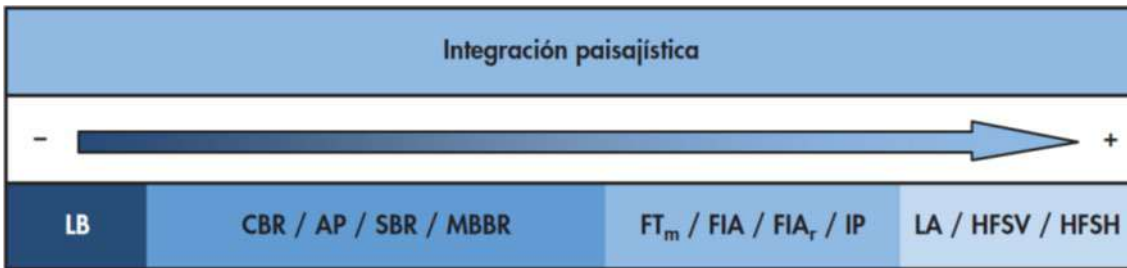


Figura II.8. Clasificación de tecnologías según su integración paisajística (MARM, 2010)

Pero también para algunos factores que pueden medirse de forma cuantitativa se podrán encontrar tablas y curvas en las guías, donde se comparan determinados atributos de las diferentes tecnologías y se establecen unos valores orientativos típicos que podrían tomarse de referencia para fijar los umbrales limitantes. Así, es posible encontrar comparaciones de superficies ocupadas o de costos entre tipos de proceso o de línea de tratamiento, incluso. En la tabla y en la figura siguientes se muestran ejemplos de valores tipo. En el primer caso corresponde a una comparación de la superficie ocupada (m²/hab.) por distintas tecnologías en una zona ecológica de Bolivia y en el segundo una curva de costos de construcción(\$/hab) para una línea de tratamiento con filtros percoladores en el El Salvador.

Tabla II.4. Requerimientos de superficie(m²/hab) para la zona ecológica de los Llanos en Bolivia para distintas líneas de tratamiento y distintos escenarios poblacionales (MMAyA, 2021)

Línea de tratamiento de nivel secundario	1.000 hab.	5.000 hab.	50.000 hab.
PreT + TI + FAFA + LAG FAC	3,69	---	---
PreT + RAFA + LAG FAC	3,53	2,60	2,93
PreT + LAG ANA + LAG FAC	2,83	2,20	2,43
PreT + TI + HSFh	1,70	1,85	---
PreT + TI + HSFv	1,14	1,04	---
PreT + LOMB	0,89	0,55	---
PreT + RAFA + FP (soporte plástico)	0,63	0,29	0,25
PreT + RAFA + FP (soporte árido)	0,65	0,30	0,25
PreT + RAFA + CBR	0,70	0,29	0,25
PreT + AE	0,83	0,51	0,31

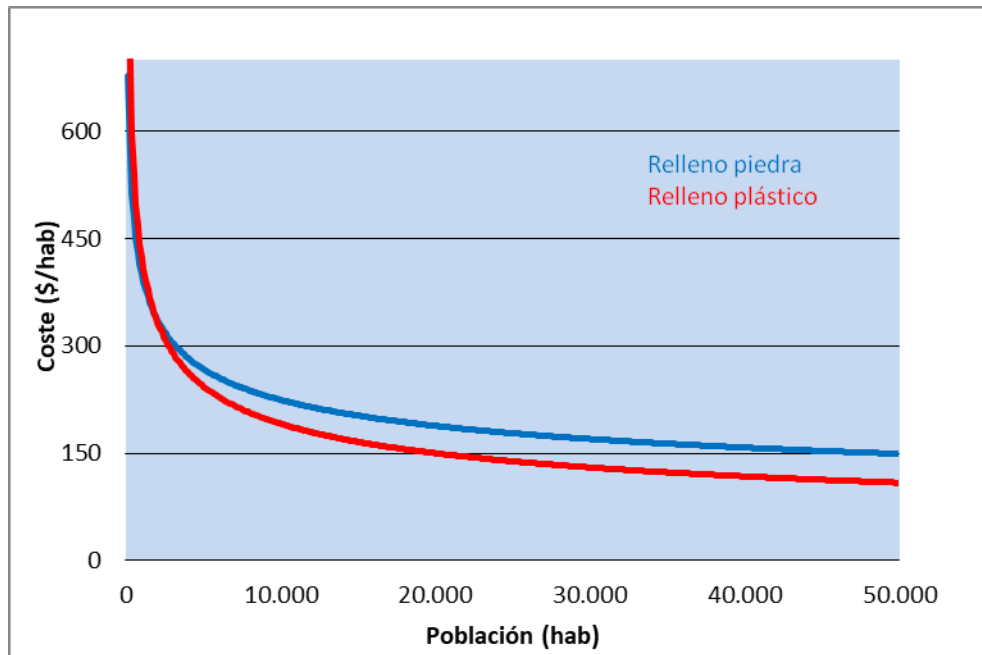


Figura II.9. Curvas de costos para filtro percoladores (MARN, 2016)

Sin embargo, se debe advertir que este tipo de tablas y curvas se construyen a partir de unos escenarios particulares para los que esa guía en concreto se ha elaborado, por lo que se deben utilizar con mucha precaución cuando se trata de un contexto diferente. Aunque puedan dar una noción de la evolución de ciertos atributos en función de determinados parámetros, el empleo directo de los umbrales de una guía solo se podrá hacer si se asegura que las bases de partida, las condiciones ambientales y cualquier otro aspecto que las condiciona (precios unitarios, por ejemplo) son muy similares a los considerados en la guía.

La siguiente figura es muy representativa de lo que pueden cambiar los atributos en función de las circunstancias locales. Muestra unas curvas teóricas de ocupación de superficie neta (la que ocupan exclusivamente los elementos de proceso) en función de las dotaciones de caudal, y para diferentes condiciones de carga unitaria de materia orgánica y temperatura. Con respecto a los rangos de valores considerados en esta figura, posteriormente se ha visto que las cargas unitarias en las pequeñas poblaciones del altiplano boliviano pueden estar en valores inferiores de 20 gDBO₅/(hab·d) y las dotaciones en grandes poblaciones de los llanos pueden superar los 250 L/(hab·d), por lo que la variabilidad dentro del país puede ser todavía mucho más grande de lo que muestra esta figura.

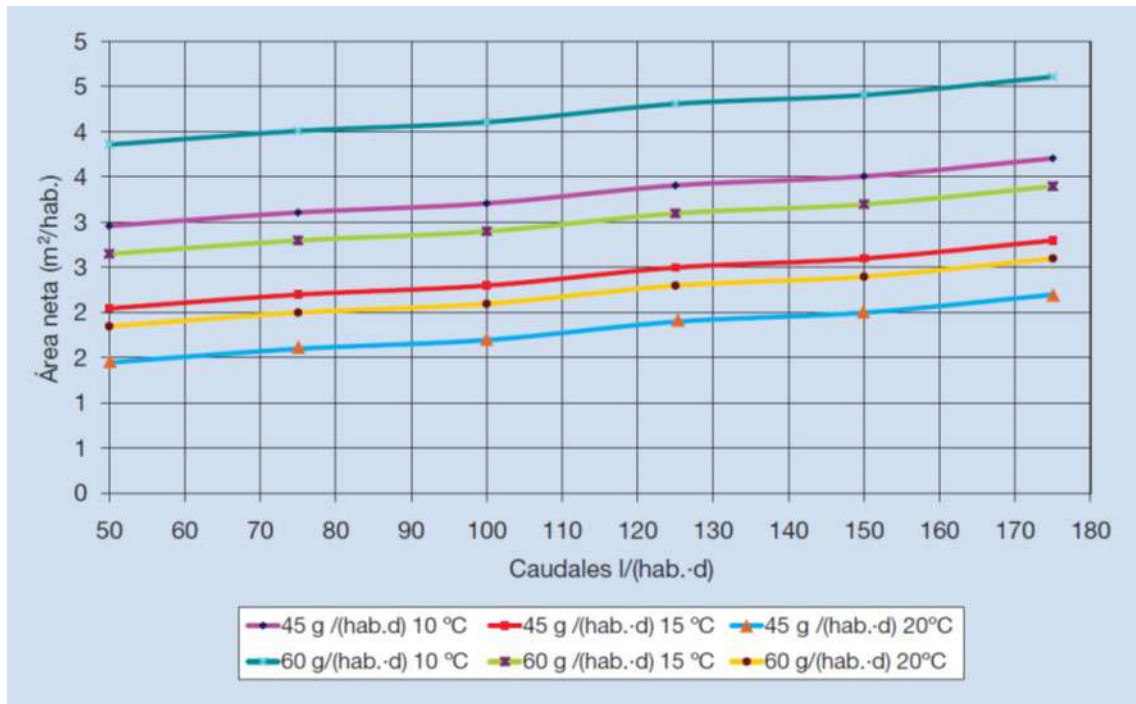


Figura II.10. Área neta para una línea formada por lagunas facultativas y de maduración, en función de la dotación de caudal y para diferentes temperaturas y cargas unitarias de DBO₅ (Wagner, 2010)

La enorme influencia del contexto queda muy claramente reflejada en la nueva guía boliviana, donde se elaboraron tablas y curvas para los escenarios de los tres pisos bioclimáticos principales (Altiplano, Valles y Llanos) y se recomienda al lector que consulte dicha guía para comprobar la magnitud de las diferencias que pueden llegar a existir dentro de un mismo país, no solo derivadas de las distintas condiciones ambientales, sino también de las socioeconómicas y de hábitos de las poblaciones, lo que repercute en unas características de las aguas residuales también muy diferentes.

Para tratar de reducir los posibles errores, se incide en que se acuda a referencias lo más similares posible al contexto del estudio y, en cualquier caso, se han identificar las principales diferencias de base y evaluar las repercusiones que hubieran tenido en los valores que se pretenden utilizar.

ANEXO III: CASO PRÁCTICO

CONTENIDOS DEL ANEXO III

III.1	EXPOSICIÓN DEL CONTEXTO, OBJETIVOS Y CONDICIONANTES LOCALES	158
III.2	IDENTIFICACIÓN INICIAL DE ALTERNATIVAS	161
III.2.1	ANÁLISIS DE CRITERIOS	163
III.2.2	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS A VALORAR	166
III.2.3	ESTRUCTURACIÓN EN CRITERIOS GENERALES Y SU PONDERACIÓN	168
III.2.4	SISTEMAS DE VALORACIÓN DE CRITERIOS GENERALES A PARTIR DE LOS FACTORES	172
III.2.5	MEDICIÓN DE LOS ATRIBUTOS	172
III.2.6	PUNTUACIÓN DE FACTORES	175
III.3	OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS FINALES	178
III.3.1	RESULTADOS OBTENIDOS	178
III.3.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS	179
III.3.3	ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES	180
III.3.4	CONCLUSIONES	182

III.1 EXPOSICIÓN DEL CONTEXTO, OBJETIVOS Y CONDICIONANTES LOCALES

Contexto de la población y objetivos del proyecto

Se quiere construir una PTAR en una población cuyas características principales se exponen a continuación:

- La población tiene en la actualidad 8.275 habitantes, presentando una tasa de crecimiento del 1,75% anual.
- La red de saneamiento, cuya ampliación se va a acometer al mismo tiempo que la construcción de la PTAR, dará servicio al 100% de la población.
- La población se encuentra relativamente alejada de poblaciones importantes.
- Su economía es básicamente agrícola. Cuenta con una pequeña industria alimentaria que, si bien no genera un incremento en la carga global apreciable, si provoca que lleguen de vez en cuando puntas de carga orgánica importantes.
- El presupuesto disponible para la implantación de esta PTAR es de 2.2250.000 USD. Son fondos provenientes de una donación a fondo perdido de una agencia de cooperación internacional. La ampliación de la red de saneamiento cuenta con su propio presupuesto.
- El año horizonte de proyecto se fija en 20 años, construyéndose en una etapa todas las instalaciones.
- Se deben cumplir los límites de vertidos establecidos en la normativa existente que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla III.1. Límites de vertido exigidos por la normativa

Parámetro	Valor máximo admisible
DBO ₅	40 mg/l
DQO	150 mg/l
SS	40 mg/l
PT	15 mg/l
Aceites y grasas	20 mg/l
NT	50 mg/l

- Aunque el vuelco se realizará a un río con caudal abundante todo el año que permite una buena dilución del vertido, en el mismo se realiza pesca artesanal y es muy deseable que el vertido tenga el menor impacto posible sobre esta actividad.
- Tres de los agricultores de la zona han manifestado interés por el reúso del agua, apoyándose en que otros agricultores de la región han logrado aumentar la productividad de los cultivos con menores requerimientos de fertilizantes al utilizar efluentes de PTAR.
- Aunque hay una actividad agrícola relevante, no existe demanda del lodo como enmienda orgánica y, por este motivo, las administraciones competentes han tomado la decisión de destinar el lodo producido a un vertedero que se encuentra a 20 km del terreno de la PTAR.

Características del agua residual a tratar

Con objeto de establecer las bases de partida del proyecto, además de los objetivos de calidad en el efluente, se debe conocer las características del agua residual. Dado que no existe disponibilidad presupuestaria para realizar campañas analíticas, las características del agua residual tendrán que realizarse por estimación.

Como se ha comentado, al margen de la componente doméstica existe solo una industria agroalimentaria que no será relevante en el cómputo global de carga que recibirá la PTAR. Por lo tanto, la determinación de caudales y cargas medias se realizará únicamente sobre la componente doméstica.

Las dinámicas de crecimiento de las últimas décadas indican que lo más probable es que haya un crecimiento aritmético o lineal de la población. Por tanto, la población en el año horizonte podrá estimarse por la siguiente fórmula:

$$P = P_0 (1 + k)^t$$

Siendo,

P: población al año horizonte (habitantes)

P₀: población actual (habitantes)

k: tasa de crecimiento (en tanto por uno)

t: años desde el momento actual hasta el año horizonte (años)

Aplicando esta fórmula se obtiene que la población en el año horizonte serán 11.707 habitantes.

Las dotaciones de abastecimiento responden a los valores promedio de la región a la que corresponde la población, que se reflejan en la tabla siguiente.

Tabla III.2. Dotaciones por rango poblacional

Habitantes	Dotaciones de agua potable (L/hab/d)
100 - 2.000	150
2.000 – 10.000	175
> 10.000	200

De acuerdo con estas dotaciones y considerando un coeficiente de retorno de 0,8 y un 15% de infiltración de pluviales dado el mal estado de la red de saneamiento separativa y las conexiones erradas, el caudal medio de aguas residuales a tratar en el año horizonte será de:

$$Q_{med} = 11.702 \text{ hab} \times 0,2 \text{ m}^3/(\text{hab} \cdot \text{d}) \times 0,8 \times 1,15 = 2.153 \text{ m}^3/\text{d}$$

Al igual que las dotaciones, las cargas contaminantes unitarias responden a los valores promedio de la región a la que corresponde la población, que se reflejan en la tabla siguiente.

Tabla III.3. Cargas contaminantes unitarias por rango poblacional

Parámetro	Habitantes		
	100-2.000 hab	2.000-10.000 hab	> 10.000 hab
SS (g/hab/día)	40	45	50
DBO ₅ (g/hab/día)	40	45	50
DQO (g/hab/día)	80	90	100
NT (g/hab/día)	8	9	10
PT (g/hab/día)	1,4	1,5	1,6

De acuerdo con el caudal medio calculado y las cargas contaminantes unitarias de la tabla anterior, se determinan las concentraciones de las aguas a tratar que se recogen en la siguiente tabla.

Tabla III.4. Concentraciones de entrada a la PTAR calculadas

Parámetro	Concentración (mg/L)
SS	272
DBO ₅	272
DQO	543
NT	54
PT	9

Características ambientales

- Se trata de clima tropical, con tres estaciones diferenciadas. Las más importantes son la estación seca (5 meses de duración donde no hay prácticamente lluvias) y la estación húmeda (4 meses de duración con una precipitación mensual de en torno a 150 mm). El resto del año son periodos de transición con una precipitación mensual de en torno a 40 mm.
- La temperatura media del aire en el mes más frío es de 22°C.
- La PTAR se ubicaría a una altitud de 110 m.s.n.m.

Características de las instalaciones existentes y del prestador

- La población cuenta con servicio de abastecimiento de buena calidad. Cubre el 90% de la población y se está ampliando para cubrir el 100%. La capacidad de pago es suficiente para soportar los servicios y el nivel de morosidad muy bajo, estando los usuarios conformes con la calidad del servicio.
- El saneamiento es colectivo en la parte más antigua de la ciudad. Tiene una red de saneamiento separativa que se ha ido ampliando poco a poco.
- El vertido en principio iba a una pequeña PTAR con una laguna que se encuentra muy cercana a la población. Rápidamente se saturó su capacidad y funcionaba en condiciones anaerobias, generando muchos problemas de olores. En la actualidad la laguna se ha colmatado y el vertido va a cauce sin tratamiento, habiéndose abandonado aquella instalación.
- En el proyecto de ampliación de la red no se ha previsto la reparación de la red antigua.

- Debido al estado de la red antigua y a la existencia de conexiones erradas, se estima que se producirá un porcentaje de infiltración potencial de un 15% del caudal medio.
- La entidad que operara la PTAR se ocupa también de la gestión del saneamiento. Es de destacar que en el entorno ya gestiona el saneamiento y tratamiento de otras dos poblaciones, algo menores que esta, que cuentan con PTAR con el sistema de Filtros Percoladores convencionales, funcionando satisfactoriamente.

Características del terreno donde se ubicará la PTAR

Se dispone de un terreno cedido por la municipalidad para la construcción de PTAR. Las características principales de este terreno serían las siguientes:

- Superficie disponible: 12.100 m²
- El terreno presenta poca pendiente, siendo la máxima diferencia de cotas de 1,8 m.
- Se ha realizado un estudio geotécnico y el suelo presenta buenas características geotécnicas, siendo poco pedregoso.
- El nivel freático se encuentra todo el año por debajo de los 3,5 m de profundidad.
- La distancia al punto de vertido en el río es de 20 m.
- La distancia a la población de 2 km, sin asentamientos poblacionales ni actividades cercanas.
- Dispone de camino de acceso y a 200 m cuenta con un punto para toma de electricidad.
- El agua residual llega por bombeo a la cota más elevada del mismo, lo que permitiría que a partir de este punto el agua discurra por gravedad.
- El costo de oportunidad del terreno es bajo ya que la actividad de la zona es eminentemente agrícola con una baja productividad y la demanda de terrenos también es reducida.

Condicionantes de las construcción y operación de las instalaciones

- En la zona no hay problemas de disponibilidad de materiales de construcción y en la región hay empresas constructoras capacitadas y con medios suficientes.
- En cuanto a la disponibilidad de repuestos y servicio técnico para reparar los equipos electromecánicos complejos que pudiera tener la PTAR, si bien hay disponibilidad en el país, la lejanía de la población a ciudades importantes representará un impedimento para tener una respuesta rápida.

Posicionamiento de la población frente al proyecto

- Aunque se hayan tenido problemas de sobrecarga en la antigua laguna, el hecho de que la nueva PTAR se encuentre alejada de la población hace que no exista un posicionamiento determinado por parte de la población, más allá de la preocupación por el incremento que pueda suponer en la tarifa actual la entrada en funcionamiento de la nueva PTAR.

III.2 IDENTIFICACIÓN INICIAL DE ALTERNATIVAS

Para simplificar el caso práctico se ha partido de un número reducido de líneas de tratamiento que podrían ser adecuadas para el tamaño y tipología de población considerada. Se muestran a continuación, junto al acrónimo que se utilizará para distinguir cada una:

- **FP piedra:**
 - Línea de agua: Pretratamiento + Tanque Imhoff + Filtro percolador con relleno de piedra con decantación secundaria estática.

- Línea de lodos: Bombeo de lodos del decantador al Tanque Imhoff + Lechos de secado
- **FP plástico:**
 - Línea de agua: Pretratamiento + Tanque Imhoff + Filtro percolador con relleno de plástico con decantación secundaria estática.
 - Línea de lodos: Bombeo de lodos del decantador al tanque Imhoff + Lechos de secado
- **RAFA+FP piedra:**
 - Línea de agua: Pretratamiento + Reactor anaeróbico de flujo ascendente + Filtro percolador con relleno de piedra con decantación secundaria estática.
 - Línea de lodos: Bombeo de lodos del decantador al RAFA + Lechos de secado
- **RAFA+FP plástico:**
 - Línea de agua: Pretratamiento + Reactor anaeróbico de flujo ascendente + Filtro percolador con relleno de piedra con decantación secundaria estática.
 - Línea de lodos: Bombeo de lodos del decantador al RAFA + Lechos de secado
- **LAG:**
 - Línea de agua: Pretratamiento + Laguna anaerobia + Laguna facultativa + Laguna de maduración
 - Línea de lodos: Lechos de secado
- **AE:**
 - Línea de agua: Pretratamiento + Aireación extendida con cámara anóxica en cabecera y decantación secundaria estática.
 - Línea de lodos: Lechos de secado
- **CBR:**
 - Línea de agua: Pretratamiento + Tanque Imhoff + Contactor biológico rotativo con decantación secundaria estática.
 - Línea de lodos: Bombeo de lodos del decantador al tanque Imhoff + Lechos de secado

Para las líneas que contienen el filtro percolador, se consideran las dos variantes, con relleno de piedra y con relleno plástico. Para el relleno de piedra se considera proceso de baja carga y sin recirculación. Para el relleno de plástico se considera proceso de media carga y con recirculación.

En la línea de aireación extendida, puesto que se va a producir una nitrificación, se incluye una cámara anóxica en cabecera del reactor para producir la desnitrificación, con lo que se ahorra oxígeno y se remueve nitrógeno total.

La línea basada en lagunas de estabilización es la única que incluye tratamiento de desinfección, que se llevaría a cabo en la laguna de maduración.

III.3 PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE DECISIÓN

A partir de aquí se comenzaría con la metodología propuesta para el análisis de alternativas de tratamiento, basado en los siguientes pasos:

- I. Análisis de criterios
- II. Selección de alternativas a valorar
- III. Estructuración de criterios y su ponderación
- IV. Establecimiento de los sistemas de valoración de criterios generales a partir de sus factores
- V. Medición de atributos

VI. Puntuación de factores

III.3.1 Análisis de criterios

En la siguiente tabla se ha sistematizado el análisis de los criterios a partir del listado de factores tipo expuestos en el capítulo 6. A partir de este análisis se identificarán los factores limitantes con sus umbrales asociados y los factores de valoración junto a los atributos identificados.

Tabla III.5. Análisis de los factores de selección tipo

Factor de selección	Análisis
A. CONDICIONANTES DEL TRATAMIENTO	
1. Calidad requerida del efluente	<p>Todas las líneas que se propongan deben cumplir con la calidad exigida por la norma (factor limitante), siendo los umbrales máximos los límites establecidos para todos los parámetros.</p> <p>Además, el hecho de que sea deseable reducir el impacto sobre la pesca artesanal que tiene lugar aguas abajo del vertido implica la minimización del amonio vertido, ya que es tóxico para los peces. Debido a esto es necesario considerar un factor de valoración específico en función del nivel de nitrificación que tenga cada línea de tratamiento. No obstante, se debe tener en cuenta al respecto que este río cuenta con un caudal abundante todo el año, lo que limitará la importancia de este factor. La capacidad para nitrificar de la línea de tratamiento es el atributo que se considera más adecuado.</p>
2. Calidad requerida en el lodo	No existen condicionantes al respecto
3. Concentración de contaminantes	Las características del agua residual son las habituales y no hay vertidos en la red que hagan sospechar de una carga tóxica para el proceso biológico, por lo que este factor no resulta relevante en este caso.
4. Variaciones de caudal y carga	Existen posibles sobrecargas puntuales de materia orgánica debido a una pequeña industria alimentaria de la zona, por lo que la tolerancia a las variaciones de carga resultará un factor de valoración a tener en cuenta, siendo la tolerancia de la línea de tratamiento a las variaciones de carga el atributo considerado.
5. Variables ambientales	<p>La temperatura media del mes más frío (22°C) hace que no existan restricciones con respecto a la misma. Si bien, la temperatura será un factor que siempre se debe tener en tener en los prediseños a realizar.</p> <p>Teniendo en cuenta la alta pluviometría de la estación lluviosa, se deberían considerar lechos de secado cubiertos para la deshidratación en el caso de que la producción de lodos sea en continuo o valorar otras tecnologías para ello, como centrifugación o filtros banda. Por lo tanto, este factor tendría que considerarse en los costos.</p>
B. CONDICIONANTES DE LA CONSTRUCCIÓN	
1. Superficie disponible	<p>La superficie disponible es limitada por lo que resultará un factor limitante, siendo el umbral 12.100 m².</p> <p>El costo de oportunidad del terreno es muy reducido ya que la demanda de terrenos es baja, por lo que no se considerará como factor de valoración.</p>
2. Otros condicionantes debidos al terreno	El terreno tiene una pendiente muy moderada y con pocos problemas para la excavación, por lo que las características constructivas del terreno son adecuadas y aparentemente no introducirán ningún sobrecosto en ninguna alternativa.

Factor de selección	Análisis
	Sin embargo, el nivel freático, aunque no es muy elevado (3,5 m) si puede suponer una dificultad constructiva para la construcción de elementos de proceso con mucha profundidad.
3. Disponibilidad de materiales y equipos	No existen condicionantes al respecto
C. SOSTENIBILIDAD TÉCNICA	
1. Requerimientos de personal cualificado	Se cuenta con una entidad operadora técnicamente solvente, que cuenta con técnicos especializados que pueden realizar las tareas de O&M o prestar apoyo en las mismas. A pesar de ello, aunque de poca importancia, la complejidad de operación sí se considera un factor relevante a tener en cuenta en la valoración. La complejidad de la O&M asociada a las líneas de tratamiento será el atributo a considerar.
2. Disponibilidad de repuestos y servicio técnico	La lejanía a ciudades grandes implica un riesgo de afección importante al funcionamiento de la PTAR en caso de averías, por lo se considera un factor a tener en cuenta en la valoración. Los requerimientos de repuestos y de servicio técnico asociados a cada línea de tratamiento se estimarán a partir del nivel de equipamiento que requieren las líneas (número de equipos y complejidad de los mismos).
D. SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA	
1. Costos de construcción	Los fondos son de donación de una agencia de cooperación y están limitados, por lo que este factor tendrá un carácter principalmente limitante y será definido como disponibilidad presupuestaria para la ejecución, siendo su umbral 2.582.000 USD. No obstante, también se consideraría como factor de valoración ya que los fondos que no se utilicen podrían destinarse a reparar la red de saneamiento antigua, y por este motivo se desea minimizar el costo de inversión de la PTAR. El costo de construcción de la PTAR será el atributo utilizado para medir este factor.
2. Costos de operación y mantenimiento	Se trata de un factor de valoración clave, ya que, aunque la capacidad de pago de los usuarios sea suficiente, estos sí que han mostrado preocupación por el incremento en la tarifa que supondrá la entrada en funcionamiento de la nueva PTAR. El costo de O&M de la línea de tratamiento será el atributo utilizado para medir este factor.
3. Costos de reposición	Dado el pequeño tamaño de la población, no va a ser posible rehabilitar las instalaciones o construirlas de nuevo cuando vayan llegando al final de su vida útil. Igualmente, si existe algún problema importante ha de contar con apoyo externo. El nivel de reposición que puede permitirse se considera incluido en los costos de O&M.
E. SOSTENIBILIDAD SOCIAL	
1. Aceptación por parte de la población	Aunque se hayan tenido problemas de sobrecarga en la antigua laguna, el hecho de que la nueva PTAR se encuentre alejada de la población y de que la implicación de la población en este tipo de proyectos es muy limitada, hace que no resulte un factor ni limitante ni de valoración relevante a tener en cuenta.
2. Riesgo de afección por olores	Aunque hay tecnologías que pueden generar mayores impactos (visuales, olfativos o sonoros que otras), no llega a ser un factor importante, al encontrarse el terreno previsto a 2 km de distancia de la población y no haber asentamientos de
3. Riesgo de afección por ruidos	

Factor de selección	Análisis
4. Impacto visual	población ni actividades económicas relevantes en las inmediaciones del terreno de la PTAR.
5. Aceptación por parte del prestador	Existe en la entidad operadora antecedentes favorables de operación de sistemas con Filtro Percolador y por este motivo se considera adecuado tener en cuenta este factor en la valoración de las alternativas.

E. SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

1. Emisiones de gases de efecto invernadero	Dado el pequeño tamaño de la instalación no se imponen condicionantes al respecto
2. Balance energético	Dado el pequeño tamaño de la instalación no se imponen condicionantes al respecto
3. Valorización de lodos	El destino de los lodos producidos será un vertedero que se encuentra a 20 km de la PTAR. No existe por lo tanto una limitación con respecto a la calidad del lodo obtener. Solo interesa que salga lo más seco posible para reducir los costos de transporte y disposición. Se considerará la gestión del lodo como una partida más de los costos de operación.
4. Reúso del agua	Aunque en principio no se plantea el reúso del agua, existe interés por parte de algunos agricultores de la zona en reutilizar el agua, por lo que, aunque con una ponderación relativa, se considera adecuado considerar este factor en la valoración. La adecuación de la línea de tratamiento el reúso será el atributo que se considerará para medir este factor.

Al margen del análisis de los factores tipo propuestos, y a la vista de los objetivos del proyecto y los condicionantes locales, no se considera necesario introducir factores adicionales.

En resumen, se considerarán los siguientes factores de selección:

- Factores limitantes y sus umbrales asociados:
 - Calidad requerida del efluente, viniendo su umbral definido por la normativa de vertidos aplicable (Tabla III.1.).
 - Superficie disponible, siendo su umbral 12.100 m².
 - Costos de construcción, siendo su umbral 2.250.000 USD.
- Factores de valoración y sus atributos asociados:
 - Mejora de la calidad para la vida piscícola / capacidad para nitrificar.
 - Tolerancia a variaciones de carga.
 - Requerimientos de personal cualificado / complejidad de la O&M de las líneas seleccionadas.
 - Disponibilidad de repuestos y de servicio técnico / nivel de equipamiento (número de equipos y sofisticación de los mismos).
 - Costos de construcción, con el condicionante del nivel freático algo elevado que puede incrementar el costo de algunos elementos y el de la pluviometría que obligará a cubrir los lechos de secado en las alternativas donde el lodo se extraiga más frecuentemente.
 - Costo de O&M.
 - Aceptación por parte del prestador.
 - Potencialidad de reúso del agua / adecuación de la línea seleccionada para el reúso.

Adicionalmente, del análisis se desprende que para poder medir alguno de los atributos de las alternativas se deberán realizar los prediseños de las diferentes alternativas adaptados a las condiciones locales.

III.3.2 Selección de alternativas a valorar

Una vez definidos los factores limitantes, se analiza el posible descarte de líneas de tratamiento que será la base de la selección de alternativas a valorar.

Factor limitante I: Calidad requerida del efluente

De acuerdo con la normativa a cumplir y las características determinadas del agua residual, los rendimientos a alcanzar por las líneas de tratamiento seleccionadas deberán ser:

Tabla III.6. Rendimientos mínimos a obtener

Parámetro	Agua residual (mg/l)	Normativa (mg/l)	Rendimiento estimado (%)
SS	272	40	85,3
DBO ₅	272	40	85,3
DQO	543	150	72,4
NT	54	50	7,4
PT	9	15	-

De acuerdo con la siguiente tabla, que recoge los rendimientos medios de las distintas líneas de tratamiento se proponen, en principio, todas las líneas de tratamiento propuestas cumplirían los requisitos de eliminación de materia en suspensión, materia orgánica y nutrientes.

Tabla III.7. Rendimientos medios de las distintas líneas de tratamiento consideradas

Líneas de tratamiento	DQO	DBO ₅	SS	NT	PT
FP	80-85	85-90	85-95	20-35	20-30
RAFA+FP	80-85	85-90	85-95	20-35	10-20
LAG	70-80	75-85	70-80	20-30	10-15
AE	80-90	85-95	85-95	80-85	20-30
CBR	80-85	85-90	85-95	20-35	20-30

Factor limitante 2: Superficie disponible

Se dispone de una superficie de 12.100 m², lo que significa una relación de 1,03 m² por habitante.

Con el objetivo de evaluar si existen restricciones claras se evalúan los requerimientos de superficie para las líneas de tratamiento consideradas y se comparan con la disponibilidad de superficie. Para ello se ha utilizado la tabla siguiente, que muestra la superficie requerida por habitante por las líneas de tratamiento consideradas para una población concreta como la del caso práctico. Esta tabla ha sido

obtenida de una guía de referencia y se ha asegurado que los diseños asociados fueron realizados con unas condiciones de caudal, concentración y temperatura que cubren las condiciones del caso práctico.

Tabla III.8. Superficie ocupada por líneas de agua, de lodos y desinfección de las distintas líneas de tratamiento consideradas

Línea de tratamiento	Superficie (m ² /hab)		
	Línea de agua	Línea de lodos	Total
AE	0,22-0,09	0,22-0,18	0,44-0,27
RAFA+FP (relleno piedra)	0,30-0,10	0,11-0,07	0,41-0,17
RAFA+FP (relleno plástico)	0,29-0,09	0,11-0,07	0,40-0,16
FP (relleno piedra)	0,40-0,11	0,12-0,18	0,52-0,29
FP (relleno plástico)	0,33-0,08	0,12-0,18	0,45-0,26
CBR	0,35-0,08	0,12-0,18	0,47-0,26
LAG	3,49-2,60	0,17-0,13	3,66-2,73

A la vista de los valores de esta tabla se descartarían las lagunas de estabilización, al no disponer de suficiente terreno para su implantación.

Factor limitante 3: Disponibilidad presupuestaria para la ejecución

Se tiene una disponibilidad presupuestaria para la ejecución limitada a 2.250.000 USD, lo que significa un presupuesto de 192 USD por habitante, teniendo en cuenta que todas las líneas de tratamiento consideradas tendrán que añadir un tratamiento de desinfección posterior.

Al igual que con la superficie disponible, con el objetivo de evaluar las líneas claramente descartables se evalúan los requerimientos económicos para la ejecución de las líneas de tratamiento que todavía no se ha descartado y se comparan con la disponibilidad presupuestaria para la ejecución. Para ello se ha utilizado la siguiente tabla, en la que se recogen los costos de ejecución por habitante para las distintas líneas de tratamiento no descartadas para el tamaño poblacional concreto del caso práctico.

Tabla III.9. Costos de ejecución de las distintas líneas de tratamiento

Línea de tratamiento	Costos de ejecución (USD/hab)		
	Línea de agua	Línea de lodos	Total
AE ¹	95	89	184
RAFA+FP (relleno piedra)	135	37	172
RAFA+FP (relleno plástico)	159	37	196
FP (relleno piedra)	168	92	260
FP (relleno plástico)	140	92	232
CBR	143	92	235

Esta tabla se ha tomado de una guía de referencia en el país, para la que los costos se han determinado en unas condiciones de terreno ideales y con unas temperaturas y características del agua residual muy similares a las del caso práctico. El único aspecto del terreno del caso práctico que difiere de la

idealidad sería el nivel freático que se encuentra a 3,5 metros y, aunque muy moderadamente, podría implicar costos de inversión adicionales en procesos que requieren de profundidades de excavación elevadas como tanques Imhoff, los reactores de la AE, decantadores o los RAFA.

Ni los filtros percoladores con tanque Imhoff, en sus dos modalidades de relleno de piedra y de plástico, ni los contactores biológicos rotativos con tanque Imhoff cumplirían con la restricción presupuestaria para la ejecución por lo que se descartan como alternativas. Si bien la línea RAFA+FP en relleno plástico tampoco cumpliría con la restricción, al ser tan solo un 2% superior al límite presupuestario, no se ha descartado.

Aunque en este caso se haya considerado la disponibilidad presupuestaria como un factor limitante, en la realidad y especialmente en los casos en que las obras son financiadas por un donante, generalmente se procura salvar esta limitación con recursos propios de la población o bien tratando de buscar financiación complementaria de otras vías. En los casos en que se construyen conjuntamente red de saneamiento y PTAR, generalmente se prefiere derivar la falta de presupuesto a la red porque lo que quede sin construir podrá en el futuro ser realizada en pequeñas partidas y, por tanto, asumida más fácilmente por la población. Incluso en otros casos, antes de renunciar a tecnologías que pueden ser más idóneas, se prefiere reducir el año horizonte del proyecto, construyéndolo por fases. En todos estos casos el exceso de costo sobre el presupuesto disponible se considerará un criterio a valorar, más que un criterio limitante.

Conclusión de la selección de alternativas

De las líneas consideradas a priori, las únicas que serían viables de acuerdo con los factores limitantes serían la de Aireación Extendida y las de RAFA + Filtro Percolador en sus dos modalidades de relleno.

III.3.3 Estructuración en criterios generales y su ponderación

La estructuración en criterios generales se ha realizado en seis criterios:

- Condicionantes del tratamiento, que incluiría los factores de mejora de la calidad para la vida piscícola y de tolerancia a variaciones de carga.
- Costos de construcción. Además de los costos típicos de la construcción de cada una de las líneas propuestas, del análisis realizado se desprende que el nivel freático debería tenerse en cuenta como condicionante de la construcción.
- Complejidad de operación, que incluiría los factores de requerimientos de personal cualificado y de disponibilidad de repuestos y de servicio técnico.
- Costos de O&M.
- Aceptación por parte del prestador.
- Potencialidad de reúso del agua.

Se ha optado por esta estructuración para que resulte fácilmente entendible por los distintos actores que tomarán parte en la decisión. Dado que el costo de construcción lo asume íntegramente una agencia de cooperación internacional y, por tanto, no tendrá ninguna repercusión en el costo del servicio de la PTAR, se ha optado por evaluarlo separadamente de la sostenibilidad económica. Dentro del ámbito de costos de construcción se evaluaría también la influencia que pudiera tener el nivel freático sobre el mismo.

Como se ha expuesto en el apartado 5.7.2 las ponderaciones a asignar no son algo que exista de forma inherente a un problema y el ejercicio de ponderación no debe tratar de encontrar el “peso verdadero”, sino encontrar la distribución de pesos de consenso.

Para realizar la ponderación se consulta a los grupos de interés más relevantes (usuarios, prestador y agencia de cooperación) y se realiza un proceso en dos iteraciones para que les resulte más sencillo de seguir. Primero se les explica los criterios generales considerados, así como los factores que componen cada uno de ellos, para que puedan asignar unos pesos a cada ámbito desde su percepción particular del problema. Para ello, como primera aproximación y para hacérselo más entendible, se les ha pedido que comparen unos ámbitos con otros, los ordenen en importancia y les asignen unos valores, de 0 a 5, basándose en la descripción de la tabla siguiente.

Tabla III.10. Niveles de ponderación considerados y coeficientes multiplicadores correspondientes

Nivel	Valor de importancia
Muy importante para la solución del problema	5
Importante	4
Importancia media	3
Poca importancia	2
Muy poca importancia	1
Carece de importancia en el análisis	0

La siguiente tabla muestra los resultados de este ejercicio hipotético en el que cada actor reflejaría la importancia que a su juicio tendría cada criterio general en relación con los otros. Asimismo, el consultor encargado del ejercicio ha realizado su propia propuesta y ha realizado otra en la que interpretaría cuál sería la preferencia de las autoridades ambientales. Finalmente, para contar con una guía de comparación de las diferentes valoraciones, se ha obtenido el promedio de todos los participantes. Se destaca que este promedio no es una propuesta de resultado, sino solo un instrumento útil para la comparación de posiciones.

Tabla III.11. Niveles de ponderación considerados por los distintos actores implicados

	Prestador	Representante de los usuarios	Agencia de cooperación	Autoridades ambientales	Consultor	Promedio
Condicionantes del tratamiento	3	0	1	5	2	2,2
Costos de construcción	2	0	5	0	2	1,8
Complejidad de operación	5	4	4	4	4	4,2
Costos de O&M	5	5	5	4	5	4,8
Aceptación por parte del prestador	4	0	0	0	1	1,0
Potencialidad de reúso	2	1	3	3	2	2,2

A partir de esta tabla se podría obtener una primera aproximación de los valores de importancia relativa equivalente que cada agente estaría otorgando a cada criterio, que queda reflejado en la siguiente tabla.

Tabla III.12. Importancia relativa de cada criterio general para los distintos actores implicados

	Prestador	Representante de los usuarios	Agencia de cooperación	Autoridades ambientales	Consultor	Promedio
Condicionantes del tratamiento	14%	0%	6%	31%	13%	13%
Costos de construcción	10%	0%	28%	0%	13%	10%
Complejidad de operación	24%	40%	22%	25%	25%	27%
Costos de O&M	24%	50%	28%	25%	31%	32%
Aceptación por parte del prestador	19%	0%	0%	0%	6%	5%
Potencialidad de reúso	10%	10%	17%	19%	13%	14%

Representando gráficamente estos resultados se podría apreciar de una manera muy visual las importantes diferencias que habría entre los diferentes interesados. En las figuras se representa cada una de las posiciones frente al valor medio de todas.

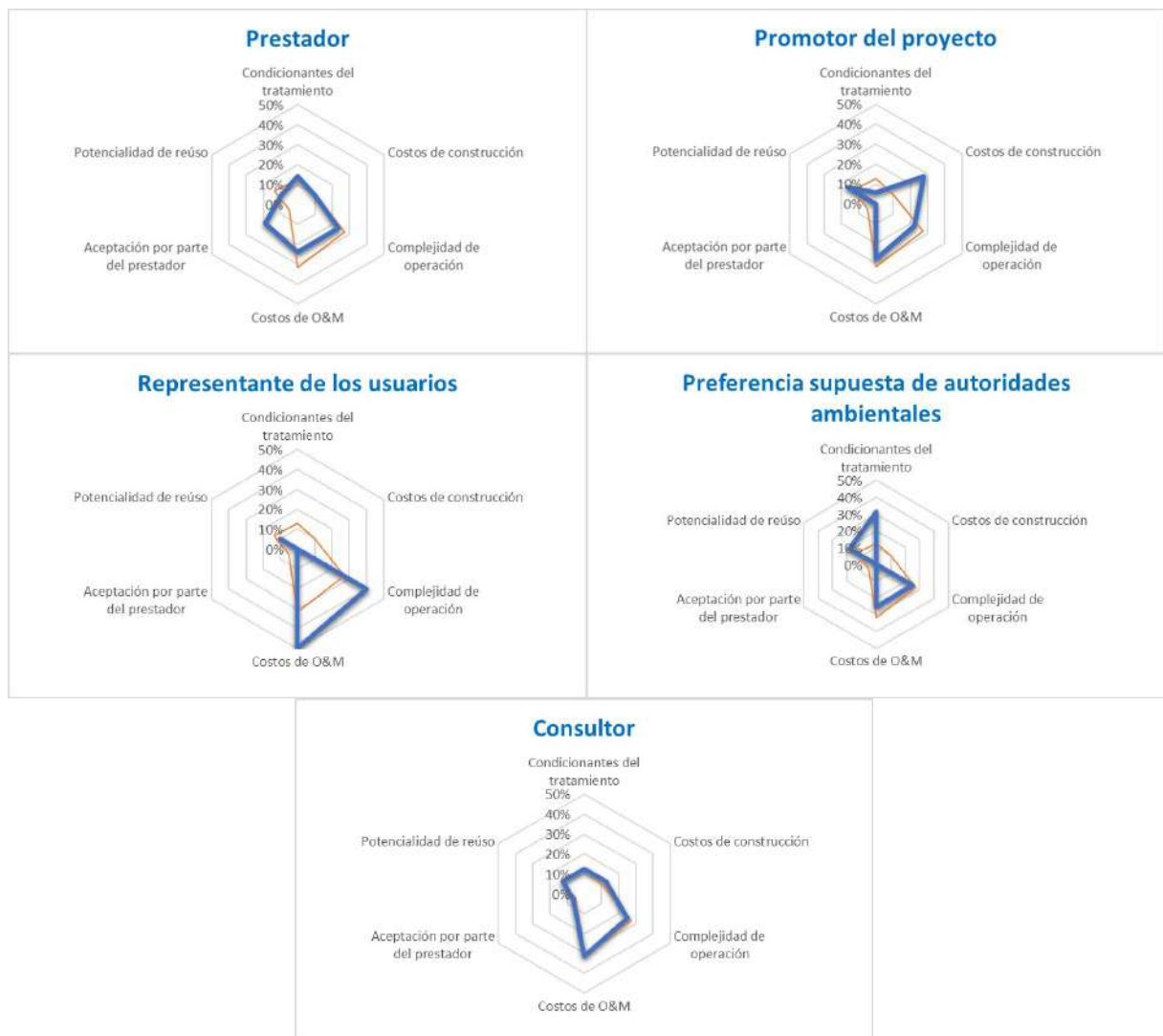


Figura III.1. Diferencias entre las ponderaciones de cada actor implicado y la ponderación promedio

A esta primera aproximación se ha llegado partiendo de unas propuestas de escala arbitrarias que, si bien facilitan la tarea de recabar la opinión de los diferentes agentes de forma homogénea, también limitan la importancia relativa que cada uno pueda dar a cada factor. Por lo que, llegado a este punto, es necesario realizar un análisis de los primeros resultados y compartirlos con los intervinientes en la decisión. Este análisis se debe focalizar en que el peso relativo que se dé a cada uno de los ámbitos será el que determine su peso relativo en la decisión final y que, desde esta perspectiva, es muy conveniente una reflexión sobre las posibles relaciones entre los ámbitos en los que se ha desagregado el análisis. Asimismo, resulta muy conveniente que todos los agentes conozcan la perspectiva de los demás y la lógica que a cada uno le lleva proponer sus valores.

Para guiar en este tipo de reflexiones a los interlocutores se pueden plantear cuestiones del tipo:

- ¿Qué importancia debería tener sobre la decisión final la sostenibilidad económica del servicio?
- ¿Qué importancia debería tener el costo de construcción?
- ¿Cómo son de importantes pueden ser en este caso los factores que afectan al tratamiento de las aguas residuales y su solución por parte del prestador?

En este caso se debe destacar que se han diferenciado, por una parte, los condicionantes técnicos del tratamiento, con objeto de que quede evidenciado la potencialidad de cada alternativa para cumplir con los objetivos de tratamiento en todo momento y, por otra, la complejidad para operar la instalación. Sin embargo, estos dos aspectos en su conjunto formarían parte de la sostenibilidad técnica. La adecuada prestación se consigue tanto por tener unas buenas instalaciones como un prestador capacitado y con recursos. Por ello convendría reflexionar si el valor conjunto que alcanzan estos dos factores sobre la decisión final sería el adecuado. Cuando se desagregan en muchos ámbitos diferentes los criterios generales, se puede perder la noción sobre la influencia que deberían tener sobre la decisión final. Por ello resulta muy adecuado la construcción de estos árboles de criterios.

A partir de este análisis de los valores relativos iniciales se pasaría a una propuesta final, tratando de llegar al máximo consenso con todos los intervinientes. En esta propuesta se ha introducido sobre todo la consideración de que la sostenibilidad técnica en este caso no debería tener un peso mayor que la sostenibilidad económica, puesto que no existen circunstancias para ello, ni desde la perspectiva de las aguas a tratar ni desde las capacidades del operador. A partir de esta consideración se ha realizado un ajuste de las importancias relativas y se llega a la distribución de pesos que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla III.13. Ponderaciones finalmente consideradas para los criterios generales

Criterio general	% de contribución
Condicionantes del tratamiento	10%
Costos de construcción	10%
Complejidad de operación	20%
Costos de O&M	40%
Aceptación por parte del prestador	5%
Potencialidad de reúso	15%

III.3.4 Sistemas de valoración de criterios generales a partir de los factores

A continuación, se establecen los sistemas de valoración de los dos criterios generales que contienen más de un factor:

Condicionantes del tratamiento

Se tienen en cuenta dos factores, capacidad para nitrificar y tolerancia a variaciones de carga. Se consideran los dos aspectos igual de importantes, por lo que cada uno condicionará la valoración del criterio en un 50%.

Complejidad de operación

Se tienen en cuenta dos factores, requerimientos de personal cualificado y disponibilidad de repuestos y de servicio técnico. A la vista del contexto, en que la entidad operadora es solvente técnicamente y que la ubicación de la población dificulta el acceso a servicio técnico y repuestos, se ha considerado un peso del 25% a los requerimientos de personal cualificado y un peso del 75% a la disponibilidad de repuestos y de servicio técnico.

III.3.5 Medición de los atributos

Superficies y costos

Se ha realizado el prediseño de cada una de las líneas de tratamiento seleccionadas, lo que permite obtener unas estimaciones de superficies, costos de implantación y costos de O&M más ajustadas a la realidad. Los resultados se muestran en la tabla siguiente.

Tabla III.14. Superficies y costos de las alternativas valoradas

Línea de tratamiento	Costos de O&M (USD/hab/año)		
	Superficie (m ²)	Costos de construcción (USD/hab)	Costos de O&M (USD/hab/año)
AE	0,32	244	15,0
RAFA+FP (piedra)	0,31	187	6,0
RAFA+FP (plástico)	0,27	204	7,2

El prediseño ha sido realizado con las herramientas de cálculo que se han generado por el CEDEX y que serán puestas a disposición para su libre descarga. No se han incluido aquí los detalles del cálculo dado que tienen una extensión importante y carece de utilidad para los objetivos de esta monografía. Sin embargo, en un caso real es imprescindible que el proyectista ponga a disposición del supervisor las hojas de cálculo que avalen estos resultados.

En los costos de construcción se ha considerado el nivel freático existente (3,5 m) que encarecería la construcción de los procesos que van enterrados significativamente, más concretamente los reactores y decantadores secundarios en la línea de AE, y los RAFA y los decantadores secundarios en las líneas de RAFA+FP. En este caso, la afección a las tres líneas sería muy similar. Por otro lado, se han considerado necesaria la cubierta de los lechos de secado para las tres alternativas.

En los costos de O&M se ha considerado un transporte del lodo al vertedero a 20 km como el costo de gestión del mismo.

Capacidad de nitrificar

Para el atributo de capacidad para nitrificar no se disponía de una clasificación específica en guías de referencia, por lo que se ha elaborado una clasificación en base a la información recopilada de la bibliografía.

Con la temperatura existente (temperatura media del mes más frío 22°C), las tres alternativas consideradas pueden nitrificar, aunque en diferente medida. La siguiente tabla muestra el rendimiento de nitrificación promedio que se obtendría, en las condiciones ambientales del proyecto, para las tres líneas de tratamiento

Tabla III.15. Rendimientos promedio de nitrificación de las alternativas (elaboración propia en base a datos de bibliografía específica)

Líneas de tratamiento	% nitrificación
RAFA+FP piedra (baja carga)	85-95
RAFA+FP plástico (media carga)	65-75
AE	90-95

La aireación extendida asegura no solo un mayor rendimiento sino también una mayor estabilidad en los resultados y, además de reducir el amonio, reduce también el nitrógeno total.

Tolerancia a las variaciones de carga

Dado que se trata de un atributo genérico, propio de cada tecnología y bastante independiente del contexto, para su medición se ha utilizado la tabla comparativa expuesta en el capítulo 6.

Tabla III.16. Tolerancia de las líneas de tratamiento a las variaciones de caudal y carga de las aguas a tratar (MMAyA, 2021)

	Líneas de tratamiento	
	Respuesta a variaciones de caudal	Respuesta a variaciones de Carga
Muy buena	LAG / HUMh	AE / LAG / RAFA+LAG / RAFA+FP / RAFA+CBR
Buena	HUMv / AE	FP / FAFA / CBR
Regular	FP ¹ / FAFA / LOMB / CBR / RAFA+LAG / RAFA+FP ¹ / RAFA+CBR	HUMh / HUMv / LOMB

¹En caso de que los Filtros Percoladores cuenten con recirculación, presentan una mayor flexibilidad ante variaciones de caudal y concentración.

Complejidad de la instalación

Sobre la complejidad de la O&M de la línea de tratamiento influirá el nivel de equipamiento de la instalación (bombeos, equipos electromecánicos y aparataje de control), así como de la complejidad de operación y control de los procesos, que requerirá de la especialización del

personal. Al igual que en el caso anterior, se trataría de un atributo genérico, propio de la tecnología, por lo que para su medición se ha utilizado la tabla comparativa expuesta en el capítulo 6.

Tabla III.17. Clasificación de las diferentes líneas de tratamiento en función de la complejidad de O&M (MMAyA, 2021)

Complejidad	Líneas de tratamiento
Muy baja	LAG / HUMh / FAFA
Baja	HUMv / LOMB
Media	RAFA+LAG / FP / CBR / RAFA+FP / RAFA+CBR
Alta	AE

Nivel de equipamiento

Este atributo es necesario medirlo de manera independiente para poder valorar el factor de disponibilidad de repuestos y de servicio técnico. Esto es, la dependencia de un servicio externo con el que puede ser difícil contar. Nuevamente se trata de un atributo característico de la tecnología y se mide mediante la tabla siguiente.

Tabla III.18. Clasificación de las diferentes líneas de tratamiento en función del nivel de equipamiento (elaboración propia).

Nivel de equipamiento	Líneas de tratamiento
Baja	LAG / HUMh / FAFA
Media	HUMv / LOMB / RAFA+LAG / FP / RAFA+FP
Alta	AE/ CBR / RAFA+CBR

Aceptación de la tecnología

Para el atributo de preferencia de la tecnología, que era específico del prestador concreto, se ha considerado realizar una medición subjetiva en base al contexto existente.

Adecuación al reúso

La adecuación al reúso se puede evaluar en función de la capacidad que tienen las líneas propuestas para reducir patógenos en el agua residual y, en menor medida la calidad del agua que se pueda alcanzar y que favorece la implantación de un sistema de desinfección terciario. Al ser un factor genérico, para su medición se ha utilizado la tabla comparativa expuesta en el capítulo 6.

Tabla III.19. Adecuación para reúso en las líneas de tratamiento consideradas (elaboración propia)

Adecuación para el reúso	Línea de tratamiento
Alto	RAFA+LAG / LAG
Medio	HUMv / AE / LOMB / CBR / FP
Bajo	HUMh / RAFA+FP / RAFA+CBR/ FAFA

III.3.6 Puntuación de factores

La puntuación de cada uno de los factores de valoración a partir de la medición de sus atributos correspondientes se ha realizado en una escala de 1 al 5, siendo 1 el valor menos favorable y el 5 el más favorable, en función de cómo se adapten las líneas analizadas a cada factor de valoración. Se ha elegido esta escala porque para muchos factores es difícil lograr una discriminación más precisa sobre el efecto de cada nivel del atributo sobre el factor.

A la hora de puntuar se han tenido en cuenta no solo las diferencias relativas entre líneas de tratamiento evaluadas, sino también el desempeño que tendrían frente a ese factor la generalidad de las líneas de tratamiento existentes, de esta forma se evita obtener resultados muy diferentes cuando realmente las capacidades de las tres líneas sean muy similares.

A continuación, se expone la justificación de la puntuación asignada a los factores considerados.

Mejora de la calidad para la vida piscícola

El atributo valorado sería la capacidad para nitrificar de la línea de tratamiento, y puesto que las tres líneas pueden nitrificar, las diferencias deberían ser limitadas. La valoración de las alternativas y su justificación sería la siguiente:

- La línea RAFA+FP (piedra), se puntúa con un 4 porque el filtro percolador de baja carga consigue un buen rendimiento, aunque la estabilidad de la nitrificación comparado con AE es menor.
- La línea RAFA+FP (plástico), se puntúa con un 3, porque al operar en media carga obtiene un rendimiento promedio menor que las otras dos opciones.
- La AE se puntúa con un 5 porque asegura un mayor rendimiento y una mayor estabilidad en los resultados.

Tolerancia a las variaciones de carga

Los lodos activos, en su modalidad de aireación prolongada, en general soportan mejor las puntas y se resentirá menos la calidad de salida que los filtros percoladores, o que los RAFA. Sin embargo, un doble proceso biológico en serie permite asegurar una mayor estabilidad en la calidad de salida y amortiguar puntas de carga. Por otro lado, los filtros percoladores pueden hacer frente mejor a estas puntas, si cuentan con una recirculación.

En base a lo comentado y tomando de apoyo la tabla de referencia, no existe mucha diferencia entre las tres alternativas, si bien se ha considerado diferenciar con un punto la solución de filtros percoladores de piedra por no tener recirculación. Así, las puntuaciones asignadas son:

- La línea RAFA+FP (piedra) se puntúa con un 4 por estar algo más limitada que las otras.
- La línea RAFA+FP (plástico) se puntúa con un 5.
- La línea AE se puntúa con un 5.

Costo de construcción

A partir de los costos de implantación por habitante obtenidos en los diseños básicos y reflejados en la tabla III.14, se obtiene un costo promedio de 212 USD/hab, siendo las diferencias relativas con respecto a este promedio bastante moderadas:

- 88 % del promedio para RAFA+FP (piedra).
- 96 % del promedio para RAFA+FP (plástico).
- 115 % del promedio para AE.

Por este motivo, las diferencias en la puntuación entre alternativas no serán muy acusada, realizándose la siguiente puntuación:

- La línea RAFA+FP (piedra) se puntúa con un 4, por ser la más económica.
- La línea RAFA+FP (plástico) se puntúa con un 3, al estar prácticamente en el valor medio.
- La línea AE se puntúa con un 2 por ser la más cara.

Requerimiento de personal cualificado

Este factor se valora a partir del atributo de complejidad de la O&M de la línea de tratamiento. Las alternativas que se valoran no se encuentran entre las más simples de operación, por lo que su puntuación no debe diferir mucho, pero aun así hay diferencias entre las mismas, tanto en lo que se refiere al nivel de equipamiento, como a la capacitación que debe tener el personal para conseguir un funcionamiento óptimo del proceso.

La línea AE, que contará con equipos sofisticados para la aireación, es sin duda la más compleja de operar y mantener. Las líneas de RAFA+FP tendrán una complejidad similar, si bien la del relleno de piedra, al no disponer de recirculación, tendrá un nivel de complejidad algo menor. Además, se debe tener en cuenta que la entidad operadora cuenta en la zona con técnicos experimentados en el manejo de Filtros Percoladores.

Por lo expuesto, y a la vista de la tabla de apoyo se dan las siguientes puntuaciones:

- La línea RAFA+FP (piedra) se puntúa con un 3, por no requerir recirculación (aunque esta diferenciación puede ser excesiva)
- La línea RAFA+FP (plástico) se puntúa con un 2.
- La línea AE se puntúa con un 1.

Disponibilidad de repuestos y de servicio técnico

Este factor se valora a partir del atributo de nivel de equipamiento. Las tecnologías que tengan un mayor número de equipos sofisticados serán penalizadas en este factor, por lo que de acuerdo con la clasificación de la tabla con la que se midió el atributo se establece la siguiente valoración:

- La línea RAFA+FP (piedra) se puntúa con un 3.
- La línea RAFA+FP (plástico) se puntúa con un 3.
- La línea AE se puntúa con un 1.

Como se puede apreciar, el atributo valorado es redundante con el anterior en el sentido de que ambos tienen una correlación directa con la sofisticación y equipos de la instalación. Si bien, en este caso el factor se ha considerado por existir también una dependencia del exterior, no solo es una dificultad interna del prestador. En este caso, a diferencia del factor anterior, no se discriminan los dos tipos de FP, por entender que un equipo de bombeo no introduce un problema de reparación mayor a la instalación, que ya cuenta con un bombeo a la entrada.

Costos de operación y mantenimiento

A partir de los costos de O&M por habitantes y año obtenidos de los diseños básicos (tabla III.14), se obtiene un costo promedio de 9,4 USD/hab/año, siendo las diferencias relativas con respecto a este promedio bastante acusadas:

- 64 % del promedio para RAFA+FP (piedra).
- 77 % del promedio para RAFA+FP (plástico).
- 160 % del promedio para AE.

Se puede apreciar una gran diferencia entre las dos opciones de RAFA + FP y la de AE, debido principalmente a los grandes requerimientos de energía para la aireación de la AE. De hecho, los costos de AE pueden suponer más del doble que los de las otras dos líneas. A partir de estas consideraciones se establece la siguiente puntuación:

- La línea RAFA+FP (piedra) se puntúa con un 4.
- La línea RAFA+FP (plástico) se puntúa con un 3.
- La línea AE se puntúa con un 1.

Aceptación por parte del prestador

En este caso se puntuará más favorablemente las tecnologías que ya son conocidas por la entidad operadora y con las han tenido buenas experiencias en su operación, lo que seguramente facilitará que su operación sea más sencilla y segura.

Conociendo la experiencia del operador, los filtros percoladores se consideran en esta valoración más favorables. No obstante, la entidad operadora no tiene ninguna experiencia con procesos de RAFA ni de aireación extendida, pero los considera tecnologías seguras y fiables. Por estos motivos se han considerado las siguientes valoraciones:

- La línea RAFA+FP (piedra) se puntúa con un 4.
- La línea RAFA+FP (plástico) se puntúa con un 4.
- La línea AE se puntúa con un 3.

Reúso del agua

El atributo considerado ha sido la adecuación de las líneas de tratamiento para el reúso. Las tres líneas de tratamiento producirían un efluente con sólidos en suspensión y materia orgánica reducidos, y por lo tanto serían candidatos a una desinfección posterior por cloración o rayos ultravioleta, y por este motivo sus puntuaciones no deben diferir demasiado.

La presencia de amonio en el agua, si se pretende clorar, genera un mayor consumo de cloro, lo que incrementará el costo y se forman además cloraminas, que pueden ser problemáticas. En consecuencia, el hecho de que la línea de aireación extendida nitrifique de una manera más segura que las otras dos se ha tenido en consideración para establecer las puntuaciones siguientes:

- La línea RAFA+FP (piedra) se puntúa con un 2.
- La línea RAFA+FP (plástico) se puntúa con un 2.
- La línea AE se puntúa con un 3.

III.4 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS FINALES

III.4.1 Resultados obtenidos

La siguiente tabla resumen se muestran las puntuaciones asignadas a los factores considerados y justificadas en el epígrafe anterior.

Tabla III.20. Puntuación de factores

Factores de selección	Puntuación		
	RAFA+FP (piedra)	RAFA+FP (plástico)	AE
Mejora de la calidad para la vida piscícola	4	3	5
Tolerancia a variaciones carga	4	5	5
Costo de construcción	4	3	2
Requerimientos de personal cualificado	3	2	1
Disponibilidad de repuestos y de servicio técnico	3	3	1
Costos de O&M	4	3	1
Aceptación por parte del prestador	4	4	3
Reúso del agua	2	2	3

Una vez obtenidas las puntuaciones el modelo de valoración se podrán obtener dos tipos de resultado:

- La valoración de cada uno de los criterios generales, para lo que se expondrá en una tabla de resultados la puntuación de los factores de cada criterio y la agregación resultante de las puntuaciones.
- La valoración general para la que se expondrá en una tabla de resultados la valoración obtenida de los criterios generales junto a la valoración general agregada para cada una de las alternativas.

En las siguientes tablas se muestra la valoración realizada para los dos criterios generales que dependen de varios factores.

Tabla III.21. Valoración criterio general “Condicionantes del tratamiento”

Factor	Valoración factor	Puntuación * Valoración factor		
		RAFA+FP (piedra)	RAFA+FP (plástico)	AE
Capacidad para nitrificar	50%	4*0,50=2,00	3*0,50=1,50	5*0,50=2,50
Tolerancia a variaciones carga	50%	4*0,50=2,00	5*0,50=2,50	5*0,50=2,50
Valoración criterio general		4,00	4,00	5,00

Tabla III.22. Valoración criterio general “Complejidad de operación”

Factor	Valoración factor	Puntuación * Valoración factor		
		RAFA+FP (piedra)	RAFA+FP (plástico)	AE
Requerimientos de personal cualificado	25%	3*0,25= 0,75	2*0,25= 0,50	1*0,25= 0,25
Disponibilidad de repuestos y servicio técnico	75%	3*0,75= 2,25	3*0,75= 2,25	1*0,75= 0,75
Valoración criterio general		3,00	2,75	1,00

A partir de los resultados anteriores, y aplicando para cada criterio general la ponderación asignada, se obtiene la valoración general, que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla III.23. Valoración general

Criterio general	Ponderación criterio	Valoración criterio* Ponderación		
		RAFA+FP (piedra)	RAFA+FP (plástico)	AE
Condicionantes del tratamiento	10%	4*0,1= 0,40	4*0,1= 0,40	5*0,1= 0,50
Costos de construcción	10%	4*0,1= 0,40	3*0,1= 0,30	2*0,1= 0,20
Complejidad de operación	20%	3*0,2= 0,60	2,75*0,2= 0,55	1*0,2= 0,20
Costos de O&M	40%	4*0,4= 1,60	3*0,4= 1,20	1*0,4= 0,40
Aceptación por parte del prestador	5%	4*0,05= 0,20	4*0,05= 0,20	3*0,05= 0,15
Potencialidad de reúso	15%	2*0,15= 0,30	2*0,15= 0,30	3*0,15= 0,45
Valoración general		3,50	2,95	1,90

III.4.2 Análisis de resultados

A partir de la valoración general, la opción más favorable sería la línea de RAFA + FP con relleno de piedra, seguida por la de RAFA+FP con relleno plástico y finalmente la de AE.

Se puede observar que el criterio general que ha resultado más determinante, con mucha diferencia, han sido los costos de O&M, seguido por la complejidad de operación (requerimientos de personal cualificado y disponibilidad de repuestos y de servicio técnico). Este resultado parece lógico, al haber pasado el corte solo tecnologías intensivas y donde una de ellas tiene un consumo energético mucho más elevado que las otras.

En el análisis por criterios generales se puede observar que, salvo en los costos de O&M, las diferencias entre alternativas no son muy acusadas. La línea de tratamiento RAFA+FP con relleno de piedra ha recibido la valoración más alta en los criterios de costo de construcción, complejidad de operación, costos de O&M y es una de las preferidas por el prestador.

La línea con AE aventajaría a las otras en los condicionantes del tratamiento y en la potencialidad de reúso, en ambos casos por la mejor reducción de nitrógeno obtenida por este tratamiento.

III.4.3 Análisis de incertidumbres

Las tecnologías de las líneas de tratamiento valoradas son ampliamente conocidas y no se considera que existan vacíos de conocimiento significativos. Por tanto, las incertidumbres que pueden resultar más significativas en este caso serían las derivadas de la medición de atributos y de la construcción del modelo de decisión.

Análisis de sensibilidad de las ponderaciones

Se analiza primeramente el efecto que pudieran tener otras ponderaciones de los criterios generales sobre los resultados finales.

Una vez identificados los criterios más favorables a la línea de tratamiento mejor valorada, se ha tratado de construir un escenario más propicio a las otras dos, variando las ponderaciones dentro de un rango que se pueda considerar todavía posible teniendo en cuenta las ponderaciones promedio obtenidas de la consulta con los agentes interesados.

La siguiente tabla muestra las ponderaciones del escenario considerado y el escenario alternativo (favorable a las dos alternativas perdedoras). Este escenario se ha construido reduciendo el peso del costo de O&M a favor de la potencialidad de reúso y de los condicionantes de tratamiento. Los nuevos resultados de la evaluación final se incluirían en la última fila de la tabla.

Tabla III.24. Análisis de sensibilidad de las ponderaciones

Criterio general	Escenario considerado	Escenario alternativo I
Condicionantes del tratamiento	10%	15%
Costos de construcción	10%	10%
Complejidad de operación	20%	20%
Costos de O&M	40%	30%
Aceptación por parte del prestador	5%	5%
Potencialidad de reúso	15%	20%
Resultado (RAFA+FP pied. / RAFA+FP plás. / AE)	3,5 / 2,95 / 1,9	3,4 / 2,95 / 2,2

Se puede observar que, incluso yendo al escenario más desfavorable que podría haberse presentado respecto a la ponderación, la línea RAFA+FP piedra sigue siendo la mejor valorada.

Análisis de sensibilidad de valoración de los criterios

En cuanto a la valoración de criterios, se ha analizado la sensibilidad tanto en las puntuaciones de los factores como de la valoración de factores dentro de un mismo criterio.

Puntuaciones de los factores

Este análisis de sensibilidad se ha centrado en los factores que tienen una incidencia mayor, teniendo en cuenta tanto la ponderación del criterio general al que corresponden como la valoración del factor dentro del criterio.

Los tres factores con mayor incidencia en la decisión son la disponibilidad de repuestos y de servicio técnico, los costos de O&M y el reúso del agua. Al igual que en el caso de las ponderaciones, se trataría de plantear un escenario más desfavorable para la línea RAFA+FP piedra. Para ello se han introducido las siguientes modificaciones en puntuaciones que pueden ser razonables:

- En el factor de requerimientos de personal cualificado, se ha elevado la puntuación de la alternativa RAFA+FP plástico a 3, el mismo que para la opción RAFA+FP piedra, ya que el único añadido en la primera línea sería la bomba de recirculación y es algo que se podría considerar razonable.
- En cuanto a los costos de O&M, dada su similitud y obviando que el caso del relleno plástico tendría un consumo energético mayor asociado a la recirculación, se ha optado por puntuar ambas líneas (RAFA+FP piedra y RAFA+FP plástico) con un 4.
- Por último, para el factor reúso del agua se ha optado por valorar la alternativa más favorable, la AE, con un 4 en lugar de un 3.

La siguiente tabla muestra las diferencias entre el escenario considerado y escenario alternativo 2, así como el resultado final obtenido en la valoración general de ambos escenarios. En este caso se puede observar que, si bien la alternativa ganadora sigue siendo la misma, la diferencia de la valoración general con respecto a la opción RAFA+FP plástico sería únicamente de 0,15 puntos (un 5% en valores relativos), una diferencia mucho más moderada que podría plantear el optar por la alternativa RAFA+FP plástico si el prestador lo considerase más adecuado.

Tabla III.25. Análisis de sensibilidad en puntuación de factores

Factores puntuados	RAFA+FP piedra / RAFA+FP plástico / AE	
	Escenario considerado	Escenario alternativo 2
Requerimientos de personal cualificado	3 / 2 / 1	3 / 3 / 1
Costos de O&M	4 / 3 / 1	4 / 4 / 1
Potencialidad de reúso	2 / 2 / 3	2 / 2 / 4
Resultado	3,5 / 2,95 / 1,90	3,5 / 3,4 / 2,05

Valoración de criterios a partir de los factores

Para la valoración de los criterios generales a partir de los factores que lo componen se realiza un ejercicio similar a los anteriores. En este caso se modifica el único criterio general que depende de varios factores que no resulta favorable a la alternativa ganadora, los condicionantes del tratamiento.

Se opta por dar más peso al factor tolerancia de variaciones de carga frente a la mejora de la calidad para la vida piscícola, ya que así sería más desfavorable para la línea RAFA+FP (piedra), cambiando la ponderación de 50%-50% a 25%-75%. En la tabla siguiente se puede observar que para este escenario no hay prácticamente variación en cuanto a las valoraciones generales obtenidas.

Tabla III.26. Análisis de sensibilidad en valoración de factores

	RAFA+FP piedra / RAFA+FP plástico / AE	
	Escenario considerado	Escenario alternativo 3
Mejora de la calidad para la vida piscícola	50%	25%
Tolerancia a las variaciones de carga	50%	75%
Resultado	3,5 / 2,95 / 1,9	3,5 / 3,0 / 1,9

III.4.4 Conclusiones

A la vista del análisis de los resultados y del análisis de incertidumbre resulta muy claro que una línea con RAFA + Filtro Percolador sería mucho más adecuada en el contexto estudiado que la AE.

La variante de baja carga, en la que el filtro percolador tiene el relleno de piedra, obtendría la mejor valoración en casi todos los criterios y en todos los escenarios estudiados en el análisis de sensibilidad. La línea de media carga con relleno plástico no se distancia mucho, obteniendo en alguno de los escenarios valoraciones similares, por lo que probablemente sería una alternativa también válida para el caso estudiado.

El único factor favorable a la opción en media carga con relleno plástico sería la tolerancia a las variaciones de carga, gracias a la recirculación. Por el contrario, en favor de la opción en baja carga con relleno de piedra estarían los factores de: mejora de la calidad para la vida piscícola, por el mayor grado de nitrificación obtenido; el costo de construcción, por el menor costo de la piedra frente al relleno plástico; los requerimientos de personal cualificado, por la menor complejidad del proceso por no contar con recirculación y los menores costos de O&M, también por no contar con recirculación. A la vista del análisis, parece claro que la opción preferible es la línea de RAFA+FP con relleno de piedra.