

PROTOCOLOS DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES



MINISTERIO DE ASUNTOS EXTERIORES, UNIÓN EUROPEA Y COOPERACIÓN



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 2021

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: 109-21-094-0

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: Lucía Sobrados Bernardos, Ana Tejero Andrés, 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

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	GLOSARIO	3
3	CONSIDERACIONES PREVIAS	5
4	PROGRAMACIÓN DE LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	7
5	EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO GLOBAL DE LA PLANTA	11
5.1	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA BRUTA	11
5.1.1	INFORMACIÓN SOBRE LA POBLACIÓN CONECTADA	11
5.1.2	MEDIDA DEL CAUDAL	13
5.1.3	MEDIDA DE PARÁMETROS DE CALIDAD	16
5.1.4	EVOLUCIÓN DIARIA DE LOS PARÁMETROS	16
5.1.5	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE ENTRADA	17
5.2	RENDIMIENTOS DE LA PTAR	17
5.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS Y DE OTROS RESIDUOS PRODUCIDOS	20
5.4	CONSUMOS ENERGÉTICOS	22
6	PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y RENDIMIENTO DE CADA PROCESO	24
6.1	PRETRATAMIENTO	24
6.1.1	DESBASTE	24
6.1.2	DESARENADO	25
6.1.3	DESENGRASADO	26
6.2	TRATAMIENTO PRIMARIO	27
6.2.1	SEDIMENTADORES PRIMARIOS	27
6.2.2	FOSAS SÉPTICAS	28
6.2.3	TANQUES IMHOFF	29
6.3	REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (RAFA)	30
6.4	FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA)	32
6.5	HUMEDALES ARTIFICIALES	33
6.5.1	HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL (HAFS)	33
6.5.2	HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTALES (HAFSSH)	33
6.5.3	HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICALES (HAFSSV)	34
6.6	LAGUNAJE	35
6.6.1	LAGUNAS ANAEROBIAS	35
6.6.2	LAGUNAS FACULTATIVAS	36
6.6.3	LAGUNAS DE MADURACIÓN	38
6.7	LOMBRIFILTROS	38
6.8	FILTROS PERCOLADORES	39
6.9	CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS	41
6.10	LODOS ACTIVADOS	42
6.11	TRATAMIENTOS DE DESINFECCIÓN	43
6.11.1	CLORACIÓN	43

6.11.2	RADIACIÓN UV	44
6.11.3	DESINFECCIÓN CON TRATAMIENTOS EXTENSIVOS	44
6.12	TRATAMIENTOS DE LODOS	45
6.12.1	PRODUCCIÓN DE LODOS	45
6.12.2	ESPEZAMIENTO DE LOS LODOS	46
6.12.3	ESTABILIZACIÓN DE LODOS	47
6.12.4	DESHIDRATACIÓN	48
6.13	LÍNEA DE GAS	50
7	BALANCES DEL PROCESO DE TRATAMIENTO	51
8	REFERENCIAS	52
	ANEXO I: PARTE DE CONTROL	53

CASOS EJEMPLO

BOX 1.	INCIDENCIA DE LA POBLACIÓN ESTACIONAL	9
BOX 2.	EJEMPLO DEL EFECTO SOBRE CARGA POR ACTIVIDAD INDUSTRIAL IMPREVISTA	12
BOX 3.	EJEMPLO DE CÁLCULO DE CAUDALES A PARTIR DE DATOS DEL CONSUMO ELÉCTRICO DEL BOMBEO	14
BOX 4.	NORMATIVA DE REDUCCIÓN PROGRESIVA DE CARGAS	18
BOX 5.	ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE PATÓGENOS (EPA 503)	21
BOX 6.	INTERPRETACIÓN DE COLORES DE LA LAGUNA (MANUAL IWA)	37
BOX 7.	FRECUENCIAS DE DESCARGA DE LODOS EN FUNCIÓN DE SU PROCEDENCIA	45

FIGURAS

FIGURA 1	VERTEDERO RECTANGULAR, TRIANGULAR Y CANAL PARSHALL	14
FIGURA 2	TAMIZ ESTÁTICO AUTOLIMPIANTE	24
FIGURA 3	CANALES DESARENADORES DE FLUJO VARIABLE	25
FIGURA 4	DESARENADOR- DESENGRASADOR	27
FIGURA 5	SEDIMENTADOR LAMELAR Y SECCIÓN (UNIVERSIDADE DA CORUÑA, 2013)	28
FIGURA 6	TANQUES IMHOFF (PTAR EL CAMPANARIO, SUCRE, BOLIVIA)	29
FIGURA 7	REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (PTAR DE LINDE PARACAYA, BOLIVIA)	30
FIGURA 8	TOMAMUESTRAS DE LODO EN UN REACTOR UASB (CHERNICHARO & BRESSANI, 2021)	31
FIGURA 9	FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (PTAR DE INDEPENDENCIA, BOLIVIA)	32
FIGURA 10	HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUPERFICIAL	33
FIGURA 11	HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL	34
FIGURA 12	HUMEDAL ARTIFICIAL VERTICAL	34
FIGURA 13	TRATAMIENTO POR LAGUNAJE CON LAGUNAS ANAEROBIAS, FACULTATIVAS Y DE MADURACIÓN	35
FIGURA 14	ESQUEMA Y SECCIÓN DE UN LOMBRIFILTO (CÁRDENAS, 2017)	39
FIGURA 15	FILTROS PERCOLADORES (PTAR EL CAMPANARIO, SUCRE, BOLIVIA)	40
FIGURA 16	ESQUEMA DE UN CBR)	41
FIGURA 17	AIREACIÓN EXTENDIDA (PTAR DE CAMBADOS, ESPAÑA)	42
FIGURA 18	ESQUEMA DE UN PROCESO DE LODOS ACTIVADOS	42
FIGURA 19	ESPEADOR POR GRAVEDAD ESTÁTICO	46
FIGURA 20	LECHOS DE SECADO (PTAR EL ABRA, BOLIVIA)	49

TABLAS

TABLA 1: COMPARATIVA DE NIVELES DE CALIDAD EXIGIDOS POR LAS NORMAS DE DIFERENTES PAÍSES.	18
TABLA 2: PARÁMETROS A EVALUAR DENTRO DE LA ETAPA DE DESBASTE	25
TABLA 3: PARÁMETROS A EVALUAR EN EL PROCESO DE DESARENADO	26
TABLA 4: PARÁMETROS A EVALUAR EN LA PROCESO DE DESENGRASADO	27
TABLA 5: PARÁMETROS A EVALUAR EN LA SEDIMENTACIÓN PRIMARIA	28
TABLA 6: PARÁMETROS A EVALUAR EN UNA FOSA SÉPTICA	29
TABLA 7: PARÁMETROS A EVALUAR EN UN TANQUE IMHOFF	30
TABLA 8: PARÁMETROS A EVALUAR EN UN RAFA	31
TABLA 9: PARÁMETROS A EVALUAR EN UN FAFA	32
TABLA 10. PARÁMETROS A EVALUAR EN UN HAFS	33
TABLA 11. PARÁMETROS A EVALUAR EN UN HAFSSH	34
TABLA 12. PARÁMETROS A EVALUAR EN UN HAFSV	35
TABLA 13: PARÁMETROS A EVALUAR EN UNA LAGUNA ANAEROBIA	36
TABLA 14: PARÁMETROS A EVALUAR EN UNA LAGUNA FACULTATIVA	36
TABLA 15: PARÁMETROS A EVALUAR EN UNA LAGUNA DE MADURACIÓN	38
TABLA 16. PARÁMETROS A EVALUAR EN UN LOMBRIFILTRO	39
TABLA 17. PARÁMETROS A EVALUAR EN UN FILTRO PERCOLADOR	40
TABLA 18. PARÁMETROS A EVALUAR EN UN CBR	41
TABLA 19. PARÁMETROS A EVALUAR EN LODOS ACTIVADOS	43
TABLA 20. PARÁMETROS A EVALUAR EN UN PROCESO DE CLORACIÓN	44
TABLA 21: PARÁMETROS A EVALUAR EN UN PROCESO DE RADIACIÓN UV	44
TABLA 22. PARÁMETROS A EVALUAR EN UN PROCESO DE ESPESAMIENTO DE LODOS	47
TABLA 23. PARÁMETROS A EVALUAR EN UN PROCESO DE ESTABILIZACIÓN DE LODOS CON CAL	47
TABLA 24. PARÁMETROS A EVALUAR EN UN PROCESO DE DIGESTIÓN AEROBIA DE LODOS	47
TABLA 25. PARÁMETROS A EVALUAR EN UN PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS	48
TABLA 26. PARÁMETROS A EVALUAR EN UNA DESHIDRATACIÓN NATURAL DEL LODO	49
TABLA 27. PARÁMETROS A EVALUAR EN UNA DESHIDRATACIÓN MECÁNICA DEL LODO	50

I Introducción

Antecedentes

Poder conocer las características de las aguas residuales generadas por las poblaciones, así como el comportamiento de los distintos tratamientos implantados, es fundamental, tanto para la selección de las tecnologías más adecuadas, como para la elaboración de los proyectos de plantas de tratamiento o para la realización de cualquier labor de planificación del sector de saneamiento.

La ausencia de información suficiente sobre caudales y cargas contaminantes que tratan las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas (PTAR) y sobre el funcionamiento y rendimiento de las mismas en la mayoría de los países latinoamericanos, hace recomendable la realización de campañas de monitoreo que permitan conocer datos reales sobre estos aspectos.

Por otro lado, el importante número de proyectos de saneamiento que la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), a través del Fondo de Cooperación de Agua y Saneamiento (FCAS) o de otros instrumentos de cooperación, está llevando a cabo, hace necesario establecer instrumentos para conocer la eficiencia de las inversiones realizadas y si las PTAR cumplen con los objetivos de depuración establecidos en los proyectos de construcción. Se debe tener en cuenta, además, que en muchos casos los proyectos de la red de saneamiento y de la planta de tratamiento se desarrollan conjuntamente por lo que no existe la posibilidad de realizar una caracterización adecuada de las aguas antes de concebir la planta de tratamiento.

Así pues, parece conveniente incluir en todos estos proyectos una etapa de pruebas de funcionamiento, a llevar acabo posteriormente a la puesta en marcha de las instalaciones, donde puedan cumplirse los objetivos anteriormente mencionados. Con este fin, por parte del Departamento del FCAS se encargó al CEDEX la elaboración de unos protocolos que pudieran servir de apoyo en la definición de estas pruebas de funcionamiento.

Las pruebas de funcionamiento y rendimiento que se desarrollan en los apartados siguientes, podrían ser también de aplicación a PTAR que estén ya en funcionamiento y en las que se desee conocer su comportamiento y su rendimiento, siempre que se realice la adaptación correspondiente para ajustar las pruebas a las características propias de la planta en cuestión. En este caso, previamente a las pruebas, debería de realizarse también una puesta a punto de las instalaciones, para conseguir que la PTAR tenga un funcionamiento estable, en los casos en que esto sea necesario.

Objetivos de las pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento están encaminadas a comprobar que tanto a nivel global de la PTAR, como a nivel de los distintos procesos y operaciones unitarias, se cumplen las condiciones de funcionamiento y los objetivos de depuración establecidos en el proyecto de construcción.

Estas pruebas, deberán realizarse cuando el constructor de la PTAR haya conseguido el funcionamiento estable de las instalaciones, que es aquel en el que todos los elementos funcionan en la forma prevista en el proyecto y la planta depura en el grado requerido el agua residual que, sin superar los caudales y características de diseño, llega a la instalación.

Los objetivos de las pruebas son los siguientes:

- Caracterizar las aguas residuales que se tratan en la PTAR, incluyendo la medida de caudal y su calidad físico-química y bacteriológica
- Conocer la calidad de las aguas depuradas y los rendimientos globales alcanzados en la depuración.
- Determinar la cuantía y calidad de los lodos producidos en la PTAR y del resto de residuos generados
- Conocer el funcionamiento y rendimiento de los distintos procesos y operaciones unitarios de la PTAR
- Determinar los costes de operación y mantenimiento. En los casos en los que existan equipos electromecánicos, tendrá especial relevancia conocer los costes asociados a la energía consumida.
- Evaluar los resultados obtenidos y, en los casos en que sea necesario, establecer las correcciones que se consideren necesarias para un adecuado funcionamiento de la instalación.

El objetivo de este documento es establecer una metodología a la hora de realizar las pruebas de funcionamiento que sirva para poder realizar las supervisiones y comprobaciones necesarias para así determinar si los procesos de la PTAR cumplen o no con las condiciones de funcionamiento.

En ningún caso estas pruebas de funcionamiento se corresponden con pruebas de funcionamiento de equipos, así como sus mecanismos, automatismos, accionamientos de puesta en marcha y parada, enclavamientos, etc., ya que estas pruebas deberían haber sido realizadas con anterioridad y no representan el objeto de esta guía.

2 Glosario

Aguas residuales urbanas: son las aguas procedentes de vertidos de las poblaciones, incluyendo efluentes domésticos, institucionales y de pequeñas industrias dentro de las poblaciones. Son las aguas que contienen valores típicos de contaminación de un agua doméstica

Carga hidráulica superficial: es una medida de la velocidad del agua residual a través del tanque.

Carga orgánica volumétrica: se define como la correlación entre la concentración contaminante de efluente entre el tiempo de residencia hidráulico.

Caudal medio diario: volumen total de un líquido que llega a un punto, dividido por el periodo de tiempo en el que se han efectuado las mediciones de dicho caudal.

Caudal máximo diario: corresponde al volumen máximo registrado que llega a un punto, dividido por el periodo de tiempo en el que se han efectuado las mediciones de dicho caudal.

Caudal mínimo diario: corresponde al volumen mínimo registrado que llega a un punto, dividido por el periodo de tiempo en el que se han efectuado las mediciones de dicho caudal.

Cloro residual: es el remanente del cloro en el agua después de que parte del añadido reaccione en el proceso de desinfección de ésta.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Se define como la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO_5) y se expresa en $mg O_2/l$.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en $mg O_2/l$.

Edad del lodo: es el tiempo medio de permanencia de los microorganismos en el proceso de lodos activados

Efluente: agua que sale del proceso de tratamiento.

Lodos: residuos sólidos o semisólidos, provenientes de sistemas de tratamiento de aguas residuales. En ocasiones también se les denomina Fangos

Nitrógeno total Kjeldahl (NTK): representa la suma de nitrógeno orgánico en sus diversas formas y el ion NH_4^+ , presentes en una muestra de agua

Nitrógeno total (N-total): comprende el nitrógeno contenido en el NTK, además de los nitritos y nitratos.

Nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺): es un compuesto inorgánico de nitrógeno que se forma durante la degradación biológica de compuestos orgánicos del nitrógeno, expresado como concentración de nitrógeno en esta forma.

Fósforo total (P-total): fósforo total, es un parámetro que representa el contenido total en fósforo de un agua.

Población estacional: se define como el incremento de población no residente en el municipio debido a actividades turísticas.

Población flotante: se define como el aumento de la población de un municipio debido a razones de desplazamientos recurrentes, como por ejemplo, desplazamientos por actividad laboral del

municipio en cuestión. Además, incluye la población residente que no está oficialmente inscritas en el censo de población de la comunidad.

Sólidos en suspensión (SS): es un parámetro que mide la cantidad de partículas sólidas que permanecen en suspensión en un agua.

Tiempo de retención hidráulica (TRH): Tiempo que una unidad de fluido permanece en una cuba o recipiente.

Velocidad ascensional o carga superficial: es el caudal de fluido dividido por la superficie del depósito de sedimentación.

Abreviaturas de procesos:

RAFA: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

FAFA: Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

HAFS: Humedal Artificial de Flujo Superficial

HAFSSH: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal

HAFSSV: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical

3 CONSIDERACIONES PREVIAS

Antes de poner en marcha la planta y que se inicien las pruebas de funcionamiento, se habrán realizado las pruebas correspondientes al funcionamiento de los distintos equipos, así como sus mecanismos, automatismos, accionamientos de puesta en marcha y parada, enclavamientos, etc., en el caso de que los hubiera y según sea el caso correspondiente a cada PTAR.

Previamente al desarrollo de estas pruebas, por tanto, debería contarse con un dossier que detalle los resultados de las pruebas realizadas tanto en la obra civil (estanqueidad de cubas y reactores, comprobación de la línea piezométrica, etc.), como en los equipos instalados, si los hubiere, que aseguren el correcto funcionamiento hidráulico, mecánico y eléctrico de las distintas unidades, así como los materiales empleados en obra civil y de los equipos que van a estar en contacto con el agua/lodo.

En este sentido se acreditará que se han realizado las siguientes comprobaciones, según cada caso:

- Sistemas de equirrepartición de caudales,
- Sistemas de bypass y aislamiento de unidades,
- Nivelación de vertederos,
- Sistemas de vaciados y purgas,
- Capacidad y modulación de los bombeos,
- Funcionamiento manual y automático de los sistemas de arranque y parada de las bombas,
- Correcto funcionamiento de la instrumentación y de los lazos de control que puedan condicionar el funcionamiento de la PTAR,
- En general, todo lo relativo al funcionamiento de los equipos e instrumentación que hubiere en cada PTAR particular.

En el caso de que la PTAR no sea de nueva construcción, este dossier debería incluir además las mediciones y análisis de seguimiento realizadas para el control de la PTAR, así como las modificaciones o reparaciones con importancia en el proceso que se hayan realizado en las instalaciones.

Asimismo, si los hubiere, todos los instrumentos que intervengan en la medición de variables necesarias para las pruebas, deberán contrastarse, calibrarse y verificarse previamente a su uso.

Antes de la realización de las pruebas se ha de preparar una **programación de pruebas específica para la PTAR** en cuestión, en la que se recojan las características concretas del programa de muestreo que se va a llevar a cabo, detallando, entre otras cosas, la duración del muestreo, el periodo o periodos del año en que va a realizarse, los puntos donde se instalarán los diferentes equipos de medición, los puntos donde se realizarán las tomas de muestra, los parámetros concretos que se van a medir y el método medición de caudal o de tipo de análisis que se van a realizar.

Los muestreos y análisis y la toma de datos necesaria deberán ser llevados a cabo por personal capacitado para ello, que también se encargará de cumplimentar regularmente el **parte de control**, el cual deberá estar disponible en todo momento (*ver anexo I*). El parte de control mostrará los distintos análisis y toma de datos que se especifican en los siguientes apartados de este documento, que servirán de base para el cálculo de rendimientos y el estudio de funcionamiento de las instalaciones. Además, este parte debería contar con un apartado denominado “incidencias”, donde se anotarán todos los problemas y anomalías que se produzcan en el funcionamiento de la PTAR,

reseñando las averías, paradas y puestas en marcha, parciales o totales, así como los elementos que requieran reparación o sustitución o cualquier otro aspecto relevante.

Para la toma de muestras y la realización de los análisis correspondientes, deberán elaborarse los correspondientes **procedimientos de muestreo y conservación de las muestras**, teniendo en cuenta la calibración de los instrumentos de medida, la cadena de custodia de las muestras recogidas, y la correspondiente determinación de los parámetros in situ y en el laboratorio, entre otras cuestiones. La metodología a utilizar en la realización de los análisis de laboratorio, será la indicada en los "Métodos Estándar para el Examen de Aguas y Aguas Residuales", editados por APHA, AWWA y WPCF, en su última edición.

4 PROGRAMACIÓN DE LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En este documento se deben incluir los controles y análisis relativos a los procesos más comunes que pueden haberse implantado en una PTAR. Dado que cada planta constará de una línea de tratamiento propia y presentará unas características determinadas, antes de comenzar las pruebas de funcionamiento, es necesario llevar a cabo una programación de las mismas para adecuarlas a las peculiaridades de cada planta. Para realizar esta programación deberían tenerse en cuenta los siguientes puntos:

A. Estudio de las instalaciones y características de las aguas de entrada.

Antes de comenzar el programa debe estudiarse la instalación de la PTAR y sus parámetros de diseño, empezando por las características de las aguas previstas para los horizontes de proyecto y para el momento inicial, y de los límites de calidad y rendimientos impuestos en diseño a la instalación.

Para ello lo adecuado sería contar con el proyecto as-built, y con la tipificación de las características ambientales como la altitud, temperatura media del agua y del aire en el mes más frío del año, temperatura en los periodos específicos en que se quiera caracterizar (momentos de alta carga, de lluvias, etc.)

Por otro lado, si es posible, se recomienda realizar una visita previa a las instalaciones para conocerlas y tomar fotografías de apoyo en el planteamiento de las pruebas.

Es importante preparar un croquis de la instalación para poder establecer sobre el mismo los puntos de muestreo.

Con respecto a las características de las aguas residuales que estén llegando a la instalación (ver apartado 5.1):

- Debe chequearse el avance de las obras en la red de saneamiento y conectividad para comprobar el grado de ajuste a las condiciones previstas en proyecto con respecto al momento en el que se realicen las pruebas.
- Deberían solicitarse y analizarse los datos que se disponga sobre las características del agua que entra en la instalación. Al menos deberían facilitarse datos de caudal.
- Solicitar información sobre si se han detectado nuevos vertidos no previstos en diseño que puedan condicionar las características de las aguas residuales (generalmente vertidos industriales).

Respecto a los lodos y residuos producidos en la planta es fundamental identificar cuál será su destino.

B. Comunicación con los responsables de las instalaciones

Otro aspecto clave para el desarrollo de las pruebas de funcionamiento, es la realización de entrevistas previas con los responsables de la PTAR, ya que estos podrán facilitar información actualizada sobre el estado y funcionamiento general de las instalaciones, las problemáticas que hayan sido identificadas y la situación base de las aguas de entrada.

C. Determinación de los puntos de muestreo.

Para poder realizar el seguimiento tanto de los rendimientos globales de la planta como de los distintos procesos, se deben identificar los puntos más apropiados para la toma de muestras. Estos puntos se ubicarán en lugares tales que permitan tomar una muestra lo suficientemente representativa y, en caso de que se realice de forma manual, no suponga un riesgo para el personal encargado de llevarlo a cabo.

Es conveniente que los puntos seleccionados queden reflejados en el diagrama de la línea de tratamiento de la PTAR, para que la toma de muestras se realice siempre en el mismo punto y según un mismo protocolo.

Estos puntos, deberían ser los mismos en los que se tomen las muestras para control de la planta una vez que las pruebas de funcionamiento hayan finalizado.

D. Establecimiento del número de líneas en funcionamiento durante las pruebas.

Dado que las PTAR se dimensionan con un horizonte temporal de 10 o 20 años, es normal que los primeros años funcionen por debajo de su capacidad máxima. Cuando esto ocurra, se intentará, cuando se disponga de varias líneas, ajustar la capacidad de tratamiento a la carga recibida para realizar las pruebas de funcionamiento y poder evaluar los rendimientos de la planta según lo establecido en el proyecto.

En cualquier caso, durante la puesta en marcha de la planta, se habrán puesto en operación todas las líneas para comprobar que no hay problemas de funcionamiento ni en los posibles equipos instalados, ni de construcción en los diferentes procesos y, en caso de que los hubiera, intentar subsanarlos.

Una vez finalizadas las pruebas de funcionamiento, el encargado de la PTAR podrá optar por trabajar con las líneas que considere oportuno buscando la optimización de los procesos instalados.

E. Determinación de los momentos para realizar las pruebas, de la duración de las mismas y de las fechas de inicio

El **inicio** del periodo de pruebas tendrá lugar una vez que todos los procesos que componen la PTAR, estén operando correctamente, es decir, una vez que haya finalizado la puesta en marcha de la planta y ésta presente un funcionamiento estacionario.

Es importante tener en consideración que no todos los procesos llegan a su funcionamiento óptimo en el mismo periodo de tiempo, así por ejemplo, en el caso de procesos anaerobios la fase de arranque puede prologarse varios meses hasta llegar a su óptimo, y por tanto, las pruebas de funcionamiento han de realizarse una vez la planta lleve este periodo de tiempo funcionando.

Esto da tiempo a que puedan surgir pequeños problemas de diseño, obra y/o se tengan que ajustar los funcionamientos a las aguas de entrada.

Sobre la **duración de las pruebas**, como caso ideal, se recomienda un periodo de aproximadamente seis meses, que contemple el funcionamiento de las instalaciones en tiempo seco y tiempo de lluvias.

Dado que este periodo puede suponer un coste muy elevado, principalmente en el caso de las plantas pequeñas, la duración de las pruebas será función de cada caso particular, debiéndose tener en cuenta el tamaño de la PTAR, la complejidad del tratamiento adoptado, las condiciones locales,

etc. En cualquier caso, se recomienda que el periodo de pruebas de funcionamiento no sea inferior a dos semanas en temporada seca y otras dos en temporada de lluvias, teniendo en cuenta que, en el caso de que surja algún problema que no se haya detectado durante el proceso de puesta en marcha, el periodo de duración de las pruebas deberá alargarse y empezar nuevamente una vez se haya solucionado el problema.

También puede optarse por alargar el periodo de pruebas de funcionamiento realizando un menor número de análisis semanales. En cualquier caso, es importante que las pruebas cubran también los fines de semana ya que en ocasiones la variabilidad de caudal y carga con respecto a los días de semana puede ser muy significativa.

Del mismo modo, el periodo de pruebas de funcionamiento deberá prolongarse en el caso de que no se obtengan los rendimientos esperados o no estén en funcionamiento algunos de los procesos de que conste la PTAR.

Por otro lado, se debe prestar especial atención a núcleos urbanos con población estacional y a zonas con alta actividad industrial, debido a la divergencia de vertidos en función de distintas campañas e incluir estos periodos también en las pruebas de funcionamiento.

También se le debería prestar atención a eventos recurrentes que tengan especial relevancia en cuanto a la carga/caudal aportado y tratar que queden también cubiertos en el periodo de realización de las pruebas de funcionamiento.

Box I. Incidencia de la población estacional

Con fin ilustrativo de la incidencia que la población estacional/flotante podría tener sobre una población se expone a continuación el caso de la ciudad de Santa Rita en Paraguay. Se trataba de una población de unos 25.000 habitantes donde anualmente tiene lugar la feria del ganado “Expo-Santa Rita” con una duración de 10 días. El grado de afluencia de esta feria es muy alto, habiéndose estimado el número de visitantes en torno a 5.000 durante estos días. Por lo tanto resultaría muy significativo a efectos de diseño de la PTAR la inclusión de esta población estacional.



Feria de Santa Rita en Paraguay 2013 (Fuente: ABC Paraguay)

F. Funcionamiento de la PTAR durante las pruebas.

Durante todo el tiempo que duren las pruebas de funcionamiento, se deberá asegurar una adecuada explotación de la planta, que permita mantener un funcionamiento estable de los procesos con el fin de evitar incidentes que puedan distorsionar los resultados. No obstante, en el caso de que durante las mismas tengan lugar incidentes que puedan distorsionar los resultados, estos deben quedar bien reportados.

Así pues, el personal que vaya a realizar las pruebas de funcionamiento debe de haber sido previamente formado. En el caso de que se aproveche el periodo de pruebas de funcionamiento para la formación del personal, este deberá estar supervisado constantemente para evitar posibles incidentes.

5 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO GLOBAL DE LA PLANTA

Para la correcta realización de las pruebas de funcionamiento es fundamental, en primer lugar, la caracterización de las aguas de entrada. Esta primera información será de gran utilidad para valorar en qué medida las condiciones de funcionamiento se corresponden con las condiciones que hubieran sido previstas en el diseño original.

Como ya se ha mencionado, es importante considerar que los diseños se hacen generalmente para unas condiciones de funcionamiento que tendrá la instalación en un año horizonte determinado de cargas máximas, por tanto, es necesario tratar de evaluar en qué medida los diferentes elementos del proceso se pueden llevar a condiciones de diseño. A este respecto uno de los aspectos clave es conocer el grado de conexión existente respecto al proyectado.

Además de la caracterización del agua bruta, es imprescindible la comprobación de los rendimientos globales de la planta. El conocimiento que aportan dichos datos no estaría completo sin la caracterización de los residuos y productos que se generan durante el tratamiento del agua residual. En este sentido, en este capítulo se establecen los parámetros que deben evaluarse para poder cumplir con los objetivos de las pruebas de funcionamiento.

5.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA BRUTA

Para las aguas residuales que llegan a la PTAR sería necesario determinar los aspectos que se recogen en los apartados siguientes.

5.1.1 Información sobre la población conectada

Al realizar la toma de datos se debe conocer el número de usuarios a los que se presta el servicio con objeto de contrastar si las estimaciones de las dotaciones y cargas por habitante empleadas en el diseño de las instalaciones son correctas. También será importante conocer los vertidos de actividades distintas a la doméstica están teniendo lugar, como por ejemplo industrias, mercados, hospitales, centros de salud, centros educacionales o restaurantes, etc.

Además deberá estimarse la población flotante que recibe el núcleo por las actividades anteriores y en el caso de que se trate de un núcleo donde gran parte de la población se encuentra fuera durante gran parte del día, evaluar la influencia que podría tendría a efectos de carga.

Por último se deberá evaluar las bases de partida al respecto en el proyecto, para conocer si las actividades identificadas, y más significativas desde el punto de vista de contaminación aportada, fueron tenidas en cuenta en el cálculo de cargas y caudales del proyecto. La posible existencia de vertidos no controlados en el diseño puede alterar completamente el funcionamiento previsto de la instalación como se muestra en el box 2.

Además, dado que habitualmente la población se conecta a la red de alcantarillado de forma gradual, existe la posibilidad de que durante las pruebas de funcionamiento, sobre todo en el caso de largos periodos de duración de las mismas, se registre un aumento de la población servida y por tanto una variación en la carga tratada. Estas variaciones deberán quedar registradas y se debería relacionar el caudal y carga tratados por la planta con la población en cada momento.

Box 2. Ejemplo del efecto sobre carga por actividad industrial imprevista

Con fin ilustrativo se expone a continuación un caso real donde la existencia de unos pequeños mataderos no controlados condicionaba completamente las características del agua a tratar. Se trata de una población real de 1.560 habitantes, cuya identificación se oculta deliberadamente porque el ánimo no es criticar a esta población sino ilustrar un problema que se podría encontrar en muchas partes en Latinoamérica.

El proceso de la planta de tratamiento es por lagunaje y consta de una sola línea de laguna anaerobia, laguna facultativa y laguna de maduración. La PTAR fue dimensionada para un caudal medio de 2 L/s y una carga de 47 kg DBO₅/d.

Una vez construida y puesta en marcha la planta de tratamiento, los operadores comprobaron que, a pesar de estar lejos de la población de diseño, las características del agua a tratar eran mucho peor que las previstas en el proyecto. El problema se debía a la existencia de cinco pequeños mataderos ilegales que fueron identificados por los servicios municipales, cuatro de los cuales sacrificaban en torno a 30 cabezas de cordero a la semana y el quinto 2 reses a la semana. Estas instalaciones no tienen ningún sistema de tratamiento y vierten directamente sobre la red de saneamiento.

Con objeto de realizar una rápida evaluación de lo que podría suponer esta sobrecarga en contaminación y caudal en la planta, se partió de los datos tipo recogidos en los BREF (documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles, Best Available Techniques Reference Document):

- **Mataderos de cordero:** Según los datos de los BREF de mataderos para canal ovino¹ la generación de aguas residuales típica para esta actividad está en el rango 5,5-8,3 m³ por tonelada de canal y la carga de DBO₅ producida en 8,89 kg/T. Considerando una generación de aguas residuales de 7 m³/T, una carga de 8,9 kg DBO₅/T, un peso medio de 25 kg/cabeza y 120 cabezas sacrificadas por semana para los cuatro mataderos de cordero, se obtienen una generación de aguas residuales de 21 m³ y una carga contaminante de 26,7 kg DBO₅ semanales.
- **Mataderos de res:** Según los datos de los BREF de mataderos para canal bovino² la generación de aguas residuales típica para esta actividad está en el rango 1,6-9,0 m³ por tonelada de canal, la carga de DBO₅ producida entre 1,8-28 kg/T, la de DQO entre 4-40 kg/T, la de nitrógeno entre 0,17-1,84 kg/T y la de P entre 0,02-0,26 kg/T. Considerando una generación de aguas residuales de 5 m³/T, una carga de 15 kg DBO₅/T, un peso medio 400 kg/cabeza, cada uno de los días que se sacrifique una res, se pueden estar aportando 2 m³ y unas cargas contaminantes de 6,0 kg DBO₅/día.

El total de los mataderos podrían estar aportando un caudal del orden de 25 m³/semana y una carga de unos 38,7 kg DBO₅/semana. Considerando que solo operan de lunes a viernes, se obtendría para los días laborables una carga media de 7,7 kg DBO₅/d. Si bien, el problema sería peor, puesto que al menos los mataderos de res no operan todos los días y los de corderos solo trabajan unas horas al día. Por tanto, algunos días se estará llegando a sobrecargas de 13 kg DBO₅/d, que entran en unas pocas horas, lo que supone un incremento de la carga orgánica en más de un 25% sobre la de diseño.

Como la planta consta de un tratamiento por lagunaje y los caudales que están llegando son menores de lo previsto (aunque las concentraciones mucho más altas), los elevados tiempos de retención de la laguna facultativa permiten laminar las puntas de estas sobrecargas, pero en la primera laguna anaerobia las sobrecargas que se producen algunos días sí generan rendimientos por debajo de lo esperado, trasladándose mayor carga a la facultativa y operando en ambos casos por encima de los valores de diseño.

¹ Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles para mataderos e industrias de subproductos animales. Tabla 3.3 (pp 114)

² Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles para mataderos e industrias de subproductos animales. Tabla 3.1 (pp 112)

<http://www.prtr-es.es/Data/images/BREF-Mataderos-versi%C3%B3n-castellano-en-educaci%C3%B3n.pdf>

Una vez ha sido recogida la información necesaria a cerca de la población conectada, tal y como se ha visto en capítulos anteriores, es necesario proceder a la caracterización de las aguas de entrada a la PTAR.

Para ello, será necesario determinar al menos los siguientes parámetros:

- Caudal diario, su evolución a lo largo del día y sus valores: máximo, medio y mínimo.
- DBO₅, DQO, SS, pH y temperatura a lo largo del día
- N-total, N-NH₄⁺, P-total, en el caso de que lo exija la normativa del país. En caso de no ser exigidos por la normativa convendría también determinar el N y el P con objeto de comprobar que las aguas residuales no presentan condiciones anómalas.
- Patógenos correspondientes en el caso de que se exija por la normativa del país.
- Evolución de los valores de Salinidad (conductividad) a lo largo del día, en caso de que se trate de un parámetro determinante o fuera del rango habitual.
- Existencia o no de SH₂ producido en las impulsiones y colectores, su evolución a lo largo del día y los valores máximos, medio y mínimo, en su caso.
- Contenido en sulfato en el caso de que cuente con procesos anaerobios.
- Grasas, en el caso de que lo exija la normativa correspondiente.

5.1.2 Medida del caudal

Siempre que sea posible, para la realización de las pruebas de funcionamiento, se deberían emplear caudalímetros de medición en continuo. Se anotarán los caudales diarios utilizando bien los registros informáticos o bien el totalizador de caudal. En el caso de que el medidor de caudal sea manual, a través de vertedero o canal Parshall, deberá anotarse el mismo cada hora durante el día y cada 3 horas durante la noche. Si no existe ningún tipo de medida de caudal o se desconfía de su estado, los caudales se medirán mediante una campaña de aforos a lo largo de 24 horas.

Estos elementos suelen contar con una reglilla para la medición del nivel del agua y, en el caso de los canales Parshall, también es frecuente que la medición del nivel de agua se efectúe con el auxilio de un flotador, que se dispone el mismo canal, o en una pileta construida al lado del canal y comunicado con él por su parte inferior. La medición del nivel de agua en vertederos y canales Parshall también se puede llevar a cabo haciendo usos sistemas ultrasónicos, que traducen automáticamente el nivel de agua medido a valores de caudales instantáneos (MMAyA, 2021).



Figura 1 Vertedero rectangular, triangular y canal Parshall

El objetivo es poder conocer las variaciones de caudal que tienen lugar a lo largo del día, para poder ajustar el funcionamiento de los procesos de la línea de agua al mismo, con el fin de optimizar los rendimientos. Una vez que se conozcan las variaciones de caudal y se haya comprobado que estas son repetitivas, podrá espaciarse la frecuencia de las medidas. No obstante, hay que tener en cuenta que, incluso una vez hayan finalizado las pruebas de funcionamiento, el control de los caudales que llegan a la planta puede ayudar a detectar la presencia de vertidos no deseados.

En PTAR de gran tamaño sin medición en continuo de caudal se recomienda instalar, durante la realización de las pruebas, un equipo portátil para el registro automatizado y en continuo del caudal.

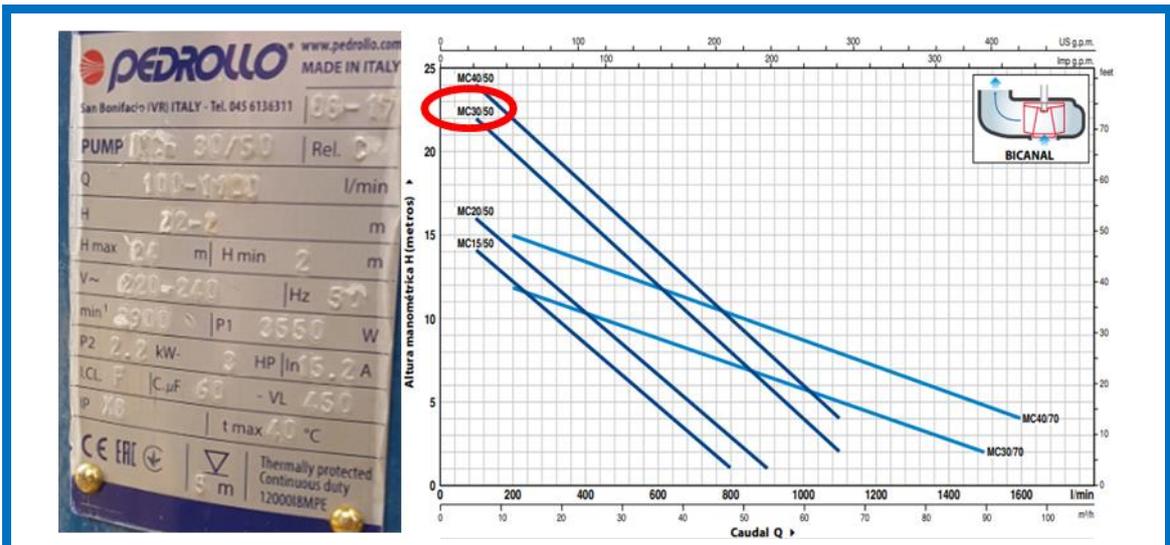
Es importante mencionar que en caso de las aguas que llegan por bombeo las medidas obtenidas en campo deben estar apoyadas por la evaluación del número de horas de funcionamiento de la bomba y las curvas de caudal de la bomba para saber el caudal concreto al que se está bombeando. Se deberán tomar las siguientes medidas

- Presión en la impulsión de la bomba
- Caudal de impulsión
- Horas de funcionamiento, si la bomba tiene cuentahoras. En caso contrario, puede usarse un contador eléctrico específico. Si tampoco se dispone de este contador y no existen otros consumos significativos de electricidad en el PTAR, las lecturas del contador general son un buen indicador del caudal de agua que se está bombeando.

Box 3. Ejemplo de cálculo de caudales a partir de datos del consumo eléctrico del bombeo

A continuación, se expone un caso de estudio de cálculo de caudales a partir de datos del consumo eléctrico de una bomba y de las curvas características de la misma.

Primero será necesario estudiar la capacidad de bombeo de la/s bomba/s existente/s. Después, se muestra la placa de datos característicos de la bomba de este caso de estudio, junto a su curva correspondiente.



Con el objetivo de evaluar la pérdida de carga existente y conocer en qué punto de la curva caudal-presión está funcionando la bomba, se obtuvo la siguiente información de los planos de la red:

- La longitud de tubería existente desde el cárcamo de bombeo a la PTAR: 1.250 metros
- El diámetro de la tubería: 150 mm
- El material de la tubería: PVC
- El número de codos de 90° existentes en la tubería: tres
- Diferencia de cota entre el punto más alto de la tubería de impulsión y la bomba: unos 8 metros (5 metros de profundidad del cárcamo de bombeo y 3 metros correspondientes a la diferencia de cota a salvar).

A partir de estos datos se calcularon las pérdidas de carga singulares y las pérdidas de carga continuas por los métodos de Manning, Colebrook-White y Hazen-Williams. Sus resultados se muestran en la siguiente tabla.

Método	Pérdidas singulares	Pérdidas continuas	Pérdidas totales
Manning		4,24 m	4,3 m
Colebrook-White	0,03 m	2,94 m	3,0 m
Hazen-Williams		3,93 m	4,0 m

Se estima que la presión que tendrá que suministrar la bomba será la correspondiente a la pérdida de carga estimada (4 metros), más la altura geométrica de impulsión (8 metros), menos la presión negativa existente en la aspiración de la bomba debido a que la bomba es sumergida (se toma como promedio la mitad de la profundidad del cárcamo de bombeo, 2,5 metros). La altura manométrica total sería por tanto de 9,5 metros, que indica que el caudal medio que estaría suministrando la bomba sería de 720 L/min (12 L/s), lo que además resultaba coherente con las medidas de caudal que se habían realizado en la campaña analítica en la entrada de la PTAR.

La siguiente tabla muestra el análisis realizado para determinar el caudal medio diario aportado por la bomba, a partir de las facturas eléctricas disponibles desde la entrada en funcionamiento de la PTAR (de octubre de 2017 a septiembre de 2018). Este análisis se ha realizado considerando un caudal medio de la bomba de 12 L/s y un consumo eléctrico de 2,2 kWh, según

se especifica en la placa característica de la bomba, que equivalen a un consumo específico de unos 0,05 kWh/m³ bombeado.

Mes	kWh	Día inicio	Día final	Periodo facturado (d)	Caudal total bombeado en periodo facturado (m3)	Caudal medio diario (m3/d)	Caudal medio PTAR (L/s)
oct-17	1.596	11/10/2017	13/11/2017	33	31.340	950	11,0
nov-17	1.723	13/11/2017	12/12/2017	29	33.833	1167	13,5
dic-17	1.223	12/12/2017	11/01/2018	30	24.015	801	9,3
ene-18	1.010	11/01/2018	09/02/2018	29	19.833	684	7,9
feb-18	268	09/02/2018	13/03/2018	32	5.263	164	1,9
mar-18	546	13/03/2018	11/04/2018	29	10.721	370	4,3
abr-18	1.363	11/04/2018	14/05/2018	33	26.764	811	9,4
may-18	1.103	14/05/2018	12/06/2018	29	21.659	747	8,6
jun-18	1.535	12/06/2018	11/07/2018	29	30.142	1039	12,0
jul-18	No disponible						
ago-18	1.646	13/08/2018	12/09/2018	30	32.321	1077	12,5
sep-18	1.277	12/09/2018	11/10/2018	29	25.076	865	10,0

5.1.3 Medida de parámetros de calidad

Generalmente las medidas del resto de parámetros se realizarán mediante toma de muestras compuestas integradas a lo largo de 24 horas, utilizando para ello, siempre que sea posible, un tomamuestras automático. En caso contrario, se elaborará una muestra compuesta de 24 horas, a partir de muestras puntuales tomadas cada 2 horas en las muestras diarias, y cada 3 horas en el caso de las nocturnas, con una frecuencia de 2 o 3 días por semana. Con estas muestras simples se elaborará una muestra compuesta, proporcional al caudal, que será la que se analice para comprobar las características del agua tratada.

Es importante tener en consideración ciertos aspectos logísticos a la hora de tomar las muestras. Para la determinación de parámetros como la DBO₅ y patógenos como los coliformes fecales precisan que las muestras sean procesadas en un laboratorio dentro de las horas siguientes a su recogida. Por esta razón es importante contar con un laboratorio próximo donde se puedan llevar las muestras compuestas, correctamente conservadas, para proceder a su análisis con rapidez.

Por otro lado, ciertos parámetros como la temperatura, el pH o la conductividad deberán ser determinados in situ.

Todos estos valores servirán para el control y seguimiento de los rendimientos de la EDAR, debiendo incluirse en un parte de control (ver anexo I).

5.1.4 Evolución diaria de los parámetros

Se considera necesario conocer la evolución diaria de los diferentes parámetros, más aun en las plantas más grandes y sobre todo si llevan asociadas un consumo energético considerable como en el caso de los procesos intensivos como los lodos activados, para poder regular los procesos y optimizar los costes de las operaciones asociadas al funcionamiento de determinados procesos con consumo energético. A tal fin conviene:

- a) En el caso de existir instrumentos de medición en continuo, determinar las variaciones horarias utilizando los registros informáticos. Los valores se representarán en una gráfica diaria.

- b) En el caso de los parámetros de determinación in situ (temperatura, pH, conductividad) resultará más sencillo realizar estas curvas.
- c) En el caso de no existir instrumentos de medición en continuo, realizar mediciones puntuales a lo largo del día cada 2 - 3 horas.

En el caso de que las pruebas de funcionamiento duren varios meses, se considera suficiente la realización de estas mediciones durante el primer mes de las pruebas de funcionamiento, a partir de que llegue la totalidad del caudal previsto en esa temporada a la planta. Además, en el caso de que varíen las condiciones de trabajo de la PTAR, estos análisis deberían repetirse, en las mismas condiciones que las descritas, para determinar las condiciones óptimas de trabajo en las nuevas condiciones.

En las plantas pequeñas, en las que la duración de las pruebas de funcionamiento será sensiblemente menor y en las que, probablemente, no se dispondrá de instrumentos de medición en continuo, sería conveniente realizar este seguimiento durante una semana de las pruebas de funcionamiento. Será necesario repetir este procedimiento en época seca y en época de lluvias, ya que se producen alteraciones significativas en las curvas de caudal y carga.

Finalmente, se deberán plasmar en gráficos las variaciones medias identificadas, pudiendo si se considera conveniente diferenciar entre fin de semana y días de semana, las curvas de diarias de caudal en todos los casos y las de cargas donde haya sido posible realizarlas.

5.1.5 Caracterización de las aguas de entrada

Con la información obtenida a partir de:

- Conocimiento sobre el estado de avance de los proyectos en las redes de saneamiento
- Detección de nuevos elementos que descargan a la red, no previstos en proyecto.
- Información sobre medición y analítica realizada

Se realizará una caracterización de las aguas y una comparación con las características previstas en proyecto. Específicamente, se realizará una comparación de las variaciones en caudales (medios, máximo y mínimo), de las cargas contaminantes promedio y de los caudales y cargas unitarias aportadas a la red.

5.2 RENDIMIENTOS DE LA PTAR

Después de la caracterización de las aguas de entrada es necesario determinar las características del efluente depurado, con el objetivo de conocer si la PTAR cumple o no con los límites exigidos por la normativa específica de vertido.

Muchas de las normativas de la región establecen sus límites como valores absolutos de concentraciones que no deben superarse. En la tabla I se incluyen, a modo de ejemplo, los principales límites impuestos a los vertidos de aguas residuales urbanas en distintos países de la región. Se puede observar que las exigencias pueden ser muy diferentes dependiendo del país y en cada caso se deberá evaluar el cumplimiento de acuerdo a los límites impuestos.

Otras normativas, sin embargo, pueden exigir rendimientos de eliminación o de reducción de cargas, al menos para algún tipo de parámetro, por lo que deberá tenerse en consideración a la hora de evaluar el cumplimiento. Incluso, en algunos casos se imponen límites diferentes que han de ser alcanzados en sucesivas etapas, lo que puede complicar la evaluación de las pruebas de funcionamiento, ya que en este caso deberá establecerse qué umbral de rendimiento se quiere probar. Ejemplos de estas normas se incluyen en el box 4.

Tabla 1: Comparativa de niveles de calidad exigidos por las normas de diferentes países.

Parámetro	Cuba ⁽¹⁾	Honduras ⁽²⁾	El Salvador ⁽³⁾	Bolivia ⁽⁴⁾	Guatemala ⁽⁵⁾	Nicaragua ⁽⁶⁾
DBO ₅ (mg/L)	30-40-60	50	60	80	100	110
DQO (mg/L)	70-90-120	200	150	250 ⁽⁷⁾	---	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
Coliformes Fecales NMP/100mL	--- ⁽⁸⁾	5x10 ³	--- ⁽⁹⁾	1x10 ³	1x10 ⁴	1x10 ³ ⁽¹⁰⁾

(1) NC 27:2012. Para ríos y embalses, dependiendo del tipo A-B-C

(2) Acuerdo N°058

(3) RTS 13.05.01:18

(4) Disposición transitoria. Decreto Supremo N° 24176

(5) A.G. N° 236-2006. Los límites establecidos en esta tabla corresponden con los límites impuestos para municipalidades que deberán ser alcanzados antes de 2032

(6) Decreto N°21-2017. Aguas de alcantarillado

(7) Aplicable a descargas de procesos mineros e industriales en genera

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

(9) 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.

(10) Para el periodo 2027-2030

Box 4. Normativa de reducción progresiva de cargas

La **normativa de Guatemala** estableció (en su redacción original) un modelo de reducción progresiva de las cargas de DBO₅, para el sistema general de vertidos, estableciendo asimismo distintas etapas de cumplimiento:

Etapa		Uno				
Fecha máxima de cumplimiento		Dos de mayo de dos mil once				
Duración, años		5				
Carga, kg/d		3000 ≤ EG <6000	6000 ≤ EG <12000	12000 ≤ EG < 25000	25000 ≤ EG < 50000	50000 ≤ EG <250000
Reducción porcentual		10	20	30	35	50
Etapa		Dos				
Fecha máxima de cumplimiento		Dos de mayo de dos mil quince				
Duración, años		4				
Carga, kg/d		3000 ≤ EG <5500	5500 ≤ EG <10000	10000 ≤ EG <30000	30000 ≤ EG <50000	50000 ≤ EG <125000
Reducción porcentual		10	20	40	45	50
Etapa		Tres				
Fecha máxima de cumplimiento		Dos de mayo de dos mil veinte				
Duración, años		5				

Carga, kg/d	3000≤EG<5000	5000≤EG<10000	10000≤ EG <30000	30000≤ EG <65000
Reducción porcentual	50	70	85	90
Etapa	Cuatro			
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinticuatro			
Duración, años	4			
Carga, kg/d	3000≤EG<4000		4000≤EG<7000	
Reducción porcentual	40		60	
EG= carga del ente generador correspondiente en kilogramos por día.				

Así, por ejemplo, un ente generador que origine una carga contaminante de 5.000 kg/d de DBO₅, antes de 2024 debería realizar una reducción del 60% de la carga de DBO₅.

Otro ejemplo de reducción por etapas se encuentra en la **norma nicaragüense**, donde se estipula que el límite máximo de Coliformes Fecales se regirá por medio del principio de Gradualidad, con el objetivo de lograr la aplicación de la Mejor Tecnología de Práctica disponible, para responder de manera progresiva a la disminución de la contaminación provenientes de las descargas de aguas residuales, siempre y cuando el vertido no se deposite a cuerpos de agua donde se afecte la salud humana (manteniendo los rangos establecidos por el Ministerio de Salud). Se establecen los siguientes límites y periodos de tiempo:

Periodo de tiempo	2017-2022	2023-2026	2027-2029
Coliformes Fecales	1x10 ⁵	1x10 ⁴	1x10 ³

En cualquier caso, para evaluar el cumplimiento de la normativa será necesaria la caracterización de las aguas de salida de la PTAR.

Los parámetros que se deben analizar serán: DBO₅, DQO, SS, N-total, N-NH₄⁺ y P-total. Cuando a las características del vertido se le exija un contenido en microorganismos patógenos determinado, estos deberán ser incluidos en la analítica de caracterización del efluente depurado.

Como norma general, es suficiente con conocer los valores medios de los diferentes parámetros, los cuales se obtendrán, al igual que en la caracterización del influente, a partir de muestras compuestas integradas de 24 horas tomadas cada 2 o 3 horas con una frecuencia de 2 o 3 días por semana.

Al calcular los rendimientos globales de la PTAR, se debería tener en cuenta el desfase que existe entre el agua de entrada y el de salida de la planta debido al tiempo de retención acumulado en cada una de las operaciones de la que consta la línea de tratamiento. Si bien en la mayoría de los procesos, el desfase es menor de un día aproximadamente, en el caso de los tratamientos extensivos, como el sistema de lagunaje o el humedal de flujo horizontal, este desfase será de varios días, por lo que debería tenerse en cuenta en la estimación de rendimientos.

Pero además, debido a los elevados tiempos de retención en lagunaje (hasta 30 días), los resultados de salida serán mucho más estables correspondiendo realmente a las características de los días del entorno. Las condiciones de mezcla hidráulica o los posibles cortocircuitos determinarán la correspondencia del agua que sale con la que entra. Por ello en este tipo de procesos las pruebas deben realizarse mejor en escala de semanas o meses que de días, pudiéndose tomar a la salida muestras puntuales y filtradas. Además, se recomienda tomar, al menos, una muestra durante el día

y otra por la noche, ya que se pueden producir alteraciones en los coliformes fecales y en el proceso de nitrificación, debido a la diferencia de temperaturas y a la radiación solar.

Así mismo, para que puedan emplearse en el control y seguimiento de los rendimientos de la PTAR, estos datos deberán incluirse en un parte de control.

5.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS Y DE OTROS RESIDUOS PRODUCIDOS

Dado que el tratamiento del agua residual genera la producción de residuos que deberán ser gestionados en función de sus características, será necesario caracterizar, no sólo el agua de entrada y salida de la planta, sino los residuos originados como consecuencia de los tratamientos a que ha sido sometida.

Estos residuos se pueden agrupar en dos categorías. Por un lado, están los flotantes, arenas y grasas (residuos) separados del agua residual en el pretratamiento y, por otro, los lodos de tratamiento (subproducto), generados en los procesos primarios y secundarios.

En primer lugar es necesario identificar los destinos de los residuos y lodos y contrastar si sus características y disposición son conformes con la normativa de aplicación. Se debe, por tanto, identificar para cada tipo en la normativa cuales pueden ser los posibles usos o destinos y conocer si se cumple o no con lo dispuesto en la norma.

En el caso de los residuos generados en el pretratamiento, se debería conocer el volumen de los residuos separados en las rejillas de desbaste, así como el volumen de las arenas recogidas tanto en la arqueta de llegada de agua bruta y el desarenado y el volumen de las grasas extraídas en los desengrasadores y en el tratamiento primario. Esto se considera principalmente interesante cuando estos residuos van a ser evacuados de la planta a otros puntos de almacenamiento/tratamiento final, ya que repercute en los costes de explotación.

Los lodos de depuración, debido a su composición, son susceptibles de ser empleados en otros usos, por lo que pueden tener diferentes destinos: disposición en vertedero y disposición en suelos o valorización agrícola, principalmente. Dependiendo del destino final de los mismos y de la normativa de aplicación será necesario un control analítico más o menos extenso.

En caso de no disponer de normas de disposición de lodos deberían tomarse en cuenta estas consideraciones:

- En todos los casos debería conocerse, además de la cantidad producida (m^3/d o $m^3/año$ y kg materia seca/ d año), la sequedad del lodo deshidratado (% materia seca). En los casos de lechos de secado se puede producir una variación de la sequedad en función de la época del año.
- Dependiendo del tipo de tratamiento del que procedan y del sistema de estabilización empleado, la cantidad de sólidos volátiles (SV) antes y después del tratamiento de estabilización.
- Para los procesos que no tengan extracción de fangos en continuo, se debe conocer la frecuencia de extracción y la cantidad extraída en cada descarga

Si el destino final del lodo va a ser su disposición en el terreno, sobre todo en el caso de su uso en agricultura deberían analizarse parámetros agronómicos para poder aplicarlos de manera controlada atendiendo a las necesidades del cultivo y evitando la contaminación de las aguas por nitratos. Entre estos parámetros estarían:

- pH
- Contenido en materia orgánica: carbono total, DQO, DBO₅
- Contenido en nutrientes: N, P, Ca, Mg, K, Fe, Na
- Contenido en metales pesados (en poblaciones a partir de un tamaño intermedio o en poblaciones menores donde se constate la presencia de industrias que pueden aportar metales a las aguas)
- En caso de que su aplicación pueda suponer algún riesgo para la salud por contacto directo o indirecto, se deberían medir microorganismos patógenos (Coliformes fecales, Salmonella y huevos de Helminetos)

Box 5. Alternativas para la reducción de patógenos (EPA 503)

La EPA 503 rule establece una clasificación de los biosólidos para su aplicación en terreno, en Clase A o Clase B, de acuerdo al nivel de patógenos presente. Si los patógenos (Salmonella sp., virus entéricos, huevos de helmintos viables) están por debajo de los niveles detectables, los biosólidos cumplen con la Clase A. Si los niveles de patógenos son detectables pero se han reducido a niveles que no representan una amenaza para la salud pública y el medio ambiente, y se hayan tomado medidas para evitar su exposición, se clasifican como Clase B.

- **Requisitos de patógenos Clase A:** la densidad de coliformes fecles debe ser menor de 1000 MPN/g de ST (peso seco), y la densidad de *Salmonella sp.* menor de 3 MPN/4 g de ST (peso seco). Además, se debe cumplir con alguno de los siguientes requerimientos:
 - Alternativa 1: Biosólidos tratados térmicamente
 - Alternativa 2: Biosólidos sometidos a un proceso de elevado pH-Alta temperatura
 - Alternativa 3: Biosólidos tratados mediante otros procesos (que puedan demostrar que se reducen los virus entéricos huevos de helmintos)
 - Alternativa 4: Biosólidos tratdos mediante procesos desconocidos
 - Alternativa 5: Biosólidos tratadis mediante uno de los tratamientos conocidos como PFRP (Process to further reduce pathogens)(ver tabla 1)
 - Alternativa 6: Biosólidos tratados mediante un proceso equivalente a un PFRP
- **Requisitos de patógenos Clase B:** Los requisitos de reducción de patógenos para la clase B, pueden ser alcanzados mediante 3 alternativas. Al contrario que en la clase A, donde los patógenos deben situarse en niveles por debajo de lo detectable, los biosólidos clase B pueden contener cierta cantidad de patógenos. Por esta razón, los requisitos de aplicación de los biosólidos clase B sobre el terreno incluyen una serie de restricciones para prevenir la cosecha de cultivos, pastoreo de animales, y acceso al público en general durante un periodo de tiempo hasta que las condiciones medioambientales hayan reducido el contenido en patógenos.
 - Alternativa 1: Monitoreo de organismos indicadores
 - Alternativa 2: Biosólidos tratados mediante procesos conocidos por un PRSP (Process to significantly reduce pathogens) (ver tabla 2)
 - Alternativa 3: Biosólidos tratados mediante un proceso equivalente a un PRSP

TABLA 1. Processes to further reduce pathogens (PFRP)

<p>1. Compostaje Se puede utilizar tanto el método de compostaje dentro del recipiente como el método de compostaje en pila aireada estática. En ambos, la temperatura de los biosólidos se mantiene a más de 55°C durante 3 días. En el método de compostaje de hileras, la temperatura debe mantenerse por encima de los 55°C durante 15 días, y las hileras se voltean al menos 5 veces durante este periodo</p> <p>2. Secado térmico Los biosólidos se secan mediante contacto directo o indirecto con gases calientes, para reducir el contenido en humedad del mismo hasta alcanzar un 10% o menos. La temperatura de las partículas de los biosólidos alcanzan los 80°C,</p> <p>3. Tratamiento térmico Los biosólidos líquidos se calientan a temperaturas de 180°C o más durante 30 min.</p> <p>4. Digestión aeróbica termófila Los lodos son agitados mediante aireación con oxígeno para mantener las condiciones aerobias. La media de tiempo de residencia es de 10 días a 55-60°C</p> <p>5. Irradiación con rayos beta Los lodos se irradian con rayos beta a dosis de al menos 1.0 megarad a temperatura ambiente</p> <p>6. Irradiación con rayos gamma Los lodos se irradian con rayos gamma de ciertos isotopos, como Cobalto 60 y Cesio 137, a temperatura ambiente</p> <p>7. Pasteurización La temperatura del biosólidos se mantiene a 70°C o más durante 30 minutos o más.</p>

TABLA 2. Processes to significantly reduce pathogens (PSRP)

<p>1. Digestión aerobia Los biosólidos son agitados con aire u oxígeno para mantener las condiciones aerobias para un tiempo de retención concreto y una temperatura (entre 40 días a 20°C y 60 días a 15°C</p> <p>2. Secado al aire Los biosólidos se secan en lechos de arena o sobre cuencas pavimentadas o no pavimentadas, durante un mínimo de 3 meses (de los cuales, durante 2 meses la temperatura media diaria debe estar por encima de los 0 °C)</p> <p>3. Digestión anaerobia Biosólidos tratados en ausencia de aire durante un tiempo de retención específico y a una temperatura específica (entre 15 días a 35°C-65°C y 60 días a 20°C</p> <p>4. Compostaje Se puede utilizar tanto el método de compostaje dentro del recipiente como el método de compostaje en pila aireada estática. En ambos, la temperatura de los biosólidos se mantiene a más de 40°C durante 5 días. Durante 4 horas durante el periodo de 5 días, la temperatura de la pila de compost debe superar los 55°C</p> <p>5. Estabilización con cal Añadir la cal suficiente como para elevar el pH a 12 de los biosólidos durante 2 horas de contacto</p>
--

Fuente: EPA Part 503 Biosolids Rule, 1994

En el caso de que exista regulación medioambiental al respecto, deberían también realizarse los análisis correspondientes para dar cumplimiento a dicha normativa. En cualquier caso, siempre que sea posible, sería conveniente poder realizar análisis de metales pesados en estos lodos para empezar a tener datos al respecto, aunque no exista en la actualidad la normativa.

5.4 Consumos energéticos

Al margen del análisis pormenorizado de los consumos eléctricos y/o térmicos de cada proceso concreto que tenga un consumo significativo de energía, resulta muy deseable realizar un balance energético global de toda la instalación.

En este balance se podría detallar a partir del consumo global eléctrico obtenido de lecturas en el/los contador/es eléctrico/s que disponga la PTAR. Mediante medida in situ del consumo de cada

uno de los procesos que tenga un consumo significativo, y estimando el número de horas al día que esa unidad de proceso estaría funcionando, se podría estimar qué porcentaje de este consumo corresponde a cada una de las unidades de proceso con consumo significativo y qué porcentaje corresponde al resto de consumos, menos significativos, de la PTAR.

Por otro lado, para completar el balance, habría que considerar el consumo de energía térmica, por ejemplo, el combustible para calderas en el caso de que la PTAR cuente con una digestión anaerobia con aporte externo de calor, así como la generación de biogás potencialmente recuperable en el caso de procesos anaerobios como podrían ser RAFA o digestión anaerobia de lodos. En estos casos si existen medidores las determinaciones se harán por esta vía, en caso contrario será necesario realizar estimaciones teóricas.

6 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y RENDIMIENTO DE CADA PROCESO

A continuación, se enumeran los diferentes parámetros que deberían controlarse para evaluar el rendimiento de cada uno de los procesos incluidos en la PTAR, así como los parámetros de funcionamiento de los procesos que deberían comprobarse, y contrastarse con los considerados en el diseño y los recomendados por las referencias bibliográficas más relevantes, para asegurar un óptimo funcionamiento.

6.1 PRETRATAMIENTO

6.1.1 Desbaste

El Desbaste constituye, generalmente, el primer proceso en el tratamiento de las aguas residuales, y tiene por objetivo básico la eliminación de sólidos de tamaño pequeño-mediano (piedras, trapos, ramas, plásticos, colillas, etc.), mediante su interceptación en rejas y/o tamices. (MMAyA, 2021)

El desbaste puede realizarse mediante rejas o tamices:

- **Rejas de limpieza manual.** Están constituidas por barrotes rectos, inclinados en relación a la horizontal. Para su limpieza, los operadores, equipados con un rastrillo, proceden periódicamente al rastrillado de los objetos retenidos en los barrotes.
- **Rejas de limpieza automática.** Incorporan un peine rascador móvil que, periódicamente y de manera automática, limpia la reja, extrayendo los residuos retenidos. Este peine puede activarse mediante un temporizador, al superarse cierto valor establecido de pérdida de carga, o mediante un sistema combinado de temporización y pérdida de carga.
- **Tamices.** El tamizado consiste en la filtración de las aguas residuales sobre un soporte delgado, dotado de orificios o ranuras. Los tamices pueden ser de diversos tipos: estático o autolimpiante, rotativos o de tambor, deslizantes, de escalera móvil o de perfil en cuña.



Figura 2 Tamiz estático autolimpiante

Tabla 2: Parámetros a evaluar dentro de la etapa de desbaste

Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • La velocidad de paso del agua en el canal en el que se ubica la reja (m/s) • La velocidad de paso del agua a través de los barrotes de la reja (m/s) • La pérdida de carga originada por la reja o tamiz (m)
Producción de residuos sólidos	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen total de residuos retirados en el desbaste (kg/d o m³/d) • Frecuencia de limpieza de las rejillas

6.1.2 Desarenado

Tiene por objetivo la separación, por acción de la gravedad, de la mayor parte de la materia más densa presente en las aguas residuales (principalmente arenas) (MMAyA, 2021).

- **Desarenadores estáticos de flujo horizontal.** En ellos el agua circula horizontalmente, depositándose en el fondo las arenas. Pueden ser de flujo constante o de flujo variable.



Figura 3 Canales desarenadores de flujo variable

- **Desarenadores aireados.** En este tipo de desarenadores se introduce aire por su parte inferior, a objeto de provocar un movimiento en espiral de las partículas de arena, controlado por la propia geometría del tanque desarenador y por la cantidad suministrada de aire. Todo esto permite reducir el contenido en materia orgánica de la arena.

Tabla 3: Parámetros a evaluar en el proceso de desarenado

Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de Retención Hidráulica a caudal máximo (min) • Velocidad horizontal (m/s) • Carga Hidráulica a Caudal máximo ($m^3/m^2.h$) • En el caso de los desarenadores aireados, suministro de aire (Nm^3/min) por metro de longitud de canal
Producción de residuos sólidos	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen de arenas recogidas (m^3) • Frecuencia de retirada de las arenas

Cuando la retirada de arena sea manual se debe evaluar el procedimiento para llevarla a cabo y asegurar que sea óptimo y no ponga en peligro la seguridad del operador.

6.1.3 Desengrasado

Esta etapa tiene por misión la separación, por acción de la gravedad, de las grasas y demás materias flotantes más ligeras que el agua (MMAyA, 2021).

Los tipos más comunes de desengrasadores que existen son:

- **Desengrasadores estáticos.** En ellos las aguas residuales pasan a través de un depósito dotado de un elemento (tubería sumergida, tabique deflector), que obliga a las aguas a salir por la parte inferior del mismo, lo que facilita que los componentes de menor densidad que el agua queden retenidos en la superficie.
- **Desengrasadores aireados.** En este caso se inyecta aire por la parte inferior del desengrasador, con el objetivo de desemulsionar las grasas y de mejorar su flotación.
- **Desarenadores-desengrasadores.** Es habitual que las operaciones de desarenado y desengrasado se realicen de manera conjunta. En estos dispositivos se distinguen dos zonas, separadas por una pantalla longitudinal, que no llega hasta el fondo de la unidad de tratamiento.
 - Una zona de tranquilización, en cuya superficie se van acumulando las grasas, y de donde son barridas periódicamente por unas rasquetas que cuelgan de un puente de vaivén.
 - Una zona turbulenta (por la inyección de aire por la parte inferior), en la que van decantado las arenas, que posteriormente son extraídas del fondo con el concurso de una bomba centrífuga que cuelga del puente de vaivén.



Figura 4 Desarenador- desengrasador

Tabla 4: Parámetros a evaluar en la proceso de desengrasado

<p>Parámetros de funcionamiento</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de Retención Hidráulica a caudal medio (min) • Velocidad horizontal (m/s) • Carga Hidráulica a Caudal máximo ($m^3/m^2 \cdot h$) • En el caso de los aireados y desarenador-desengrasador, suministro de aire (Nm^3/h por m^2 superficie desarenador)
<p>Producción de residuos sólidos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen de grasas retiradas (m^3) • Frecuencia de retirada de las grasas

6.2 Tratamiento primario

El principal objetivo de esta etapa es la separación de los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales (MMAyA, 2021).

6.2.1 Sedimentadores primarios

En los sedimentadores primarios se produce la separación de una parte importante de los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales por acción de la gravedad. A diferencia de las fosas sépticas y los tanques Imhoff, un sedimentador primario no almacena ni estabiliza los lodos decantados.

Los sedimentadores pueden ser:

- **Sedimentadores estáticos.** A su vez se dividen en cilindrocónicos (para pequeños caudales) (MARM, 2010) y lamelares, que emplean un elemento físico (lamela), que se dispone inclinado y contra el que chocan las partículas en su recorrido de sedimentación, para deslizarse sobre ella posteriormente.

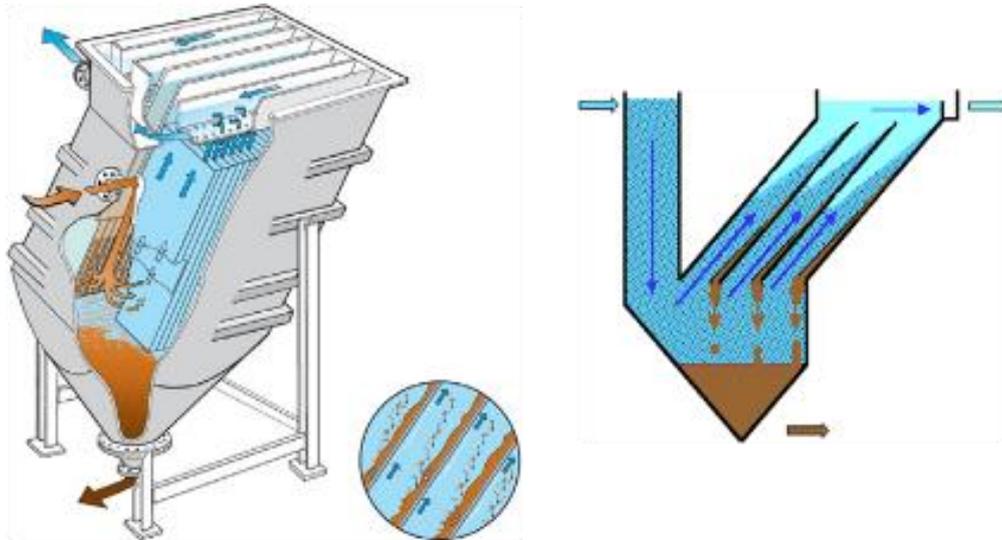


Figura 5 Sedimentador lamelar y sección (Universidade da Coruña, 2013)

- **Sedimentadores dinámicos.** Cuentan con elementos mecánicos que se emplean para retirar los flotantes y para conducir los lodos sedimentados hacia la poceta de evacuación.

Tabla 5: Parámetros a evaluar en la sedimentación primaria

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L)
Producción de lodos de la decantación primaria	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad o volumen del lodo primario (kg/d o m³/d) • Concentración del lodo primario (% de materia seca) • Frecuencia de extracción de los lodos
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Carga hidráulica a caudal medio y máximo (m³/m²/h) • Tiempo de Retención Hidráulica a caudal medio y máximo (h) • Carga sobre vertedero (m³/h/m)

6.2.2 Fosas sépticas

Las fosas o tanques sépticos son dispositivos que permiten la reducción del contenido en sólidos en suspensión, tanto sedimentables como flotantes. En ellos se desarrollan procesos físicos y biológicos, en los cuales se separan los sólidos sedimentables y flotantes por gravedad, y la parte flotante experimenta reacciones de degradación anaerobia.

Tabla 6: Parámetros a evaluar en una fosa séptica

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L)
Producción de lodos	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad o volumen del lodo (kg/d o m³/d) • Concentración del lodo (% de materia seca) • Frecuencia de extracción de lodos
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Carga hidráulica a caudal medio (m³/m²/h) • Tiempo de Retención Hidráulica a caudal medio (h)

6.2.3 Tanques Imhoff

Las Tanques Imhoff son dispositivos que permiten el Tratamiento Primario de las aguas residuales, reduciendo su contenido en sólidos en suspensión, tanto sedimentables como flotantes. Presentan dos zonas diferenciadas, una zona de sedimentación (en la parte superior) y una zona de digestión de lodos (en la parte inferior).

Al igual que los tanques sépticos se dan lugar procesos tanto físicos como biológicos, pero se diferencian en que los tanques Imhoff presentan corta estancia en la zona de decantación, lo que permite efluentes con bajo grado de septicidad.



Figura 6 Tanques Imhoff (PTAR El Campanario, Sucre, Bolivia)

Tabla 7: Parámetros a evaluar en un Tanque Imhoff

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L)
Producción de lodos	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad o volumen del lodo (kg/d o m³/d) • Concentración del lodo (% de materia seca) • Acumulación de lodos en la zona de digestión (m³) • Frecuencia de extracción de lodos
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Carga hidráulica a caudal máximo (m³/m²/h) en la zona de sedimentación • Tiempo de Retención Hidráulica a caudal máximo (h) en la zona de sedimentación • Tiempo de Retención de Fangos (meses)

6.3 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (RAFA)

Los RAFA son una tecnología de tratamiento anaerobia en la que las aguas residuales a tratar pasan a través de un manto de lodos a baja velocidad ascensional. En este tipo de tratamiento tiene lugar una sedimentación primaria, una reacción biológica y una digestión anaerobia de los lodos.



Figura 7 Reactor Anaerobio de flujo Ascendente (PTAR de Linde Paracaya, Bolivia)

En la parte superior del reactor se sitúa un separador trifásico que hace posible la decantación de los sólidos sedimentables (que se conducen a la zona de digestión del fondo del reactor), y permite la extracción del biogás generado en los procesos anaerobios.

Tabla 8: Parámetros a evaluar en un RAFA

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L)
Producción de lodos	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad o volumen del lodo (kg/d o m³/d) • Concentración del lodo (% de materia seca) • Altura de la capa de lodos en el reactor (m) • Perfil de concentración de lodos en el reactor • Frecuencia de extracción de lodos
Producción de gas	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen de gas producido en condiciones normales (Nm³/d) • Riqueza de gas en CH₄ (%)
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de retención hidráulica a caudal medio y a caudal mínimo (h) en el reactor • Tiempo de retención hidráulica a caudal máximo (h) en la zona de decantación • Carga hidráulica a caudal medio y a caudal máximo (m³/m²/h) en el reactor • Carga hidráulica a caudal máximo (m³/m²/h) en la zona de decantación • Temperatura media del agua (°C) • pH • Otros: concentración de sulfatos (mg/l), alcalinidad (mg CaCO₃/L); alcalinidad debida a las sales de AGV (mg CaCO₃/L); acumulación de natas (m³)

Para conocer el perfil de concentración de lodos en el reactor es necesario disponer de tomamuestras a varias alturas en el reactor.



Figura 8 Tomamuestras de lodo en un reactor UASB (Chernicharo & Bressani, 2021)

6.4 FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA)

Al igual que los RAFA, los FAFA son una tecnología de tratamiento de aguas residuales vía anaerobia, haciendo pasar las aguas en sentido ascendente a través de un material filtrante. Los filtros anaerobios en general están recomendados para poblaciones de pequeño tamaño.

Las aguas residuales, tras pasar por una etapa de Tratamiento Primario (Tanque Séptico o Tanque Imhoff), se introducen por la parte inferior del filtro, bien a través de un falso fondo, coronado en su parte superior por una losa perforada que retiene al material de soporte y que permite el paso de las aguas a tratar, o bien, de una parrilla de distribución, dispuesta en el fondo del filtro.



Figura 9 Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (PTAR de Independencia, Bolivia)

Tabla 9: Parámetros a evaluar en un FAFA

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none">• DBO₅ (mg/L)• DQO (mg/L)• SS (mg/L)
Producción de lodos del tratamiento	<ul style="list-style-type: none">• Cantidad o volumen del lodo primario (kg/d o m³/d)• Concentración del lodo primario (% de materia seca)• Frecuencia de extracción de lodos
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none">• Tiempo de retención hidráulica a caudal medio y a caudal mínimo (h)• Carga hidráulica a caudal medio y a caudal máximo (m³/m²/h)• pH• Temperatura media del agua (°C)• Otros: generación de H₂S (mg/L) (problemas de olores o corrosiones)

Cuando sea posible se tomarán las muestras hacer entre la fosa y el filtro, en caso contrario, se pueden medir después del tren fosa-filtro.

6.5 HUMEDALES ARTIFICIALES

Los Humedales Artificiales son sistemas de tratamiento de las aguas residuales que reproducen los mecanismos de eliminación de las sustancias contaminantes que se dan en las zonas húmedas naturales (MMAyA, 2021).

6.5.1 Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS)

En este tipo de humedales el agua se encuentra expuesta directamente a la atmósfera y circula, preferentemente, a través de los tallos de las plantas. Pueden considerarse estos humedales como una variedad de los lagunajes clásicos con la diferencia que operan a profundidades de lámina de agua bajos y que las balsas se encuentran colonizadas por plantas acuáticas emergentes.

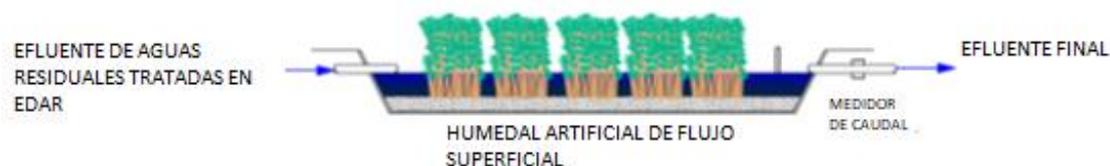


Figura 10 Humedal Artificial de Flujo Superficial

Tabla 10. Parámetros a evaluar en un HAFS

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L) • N total ¹(mg/L) • P total (mg/L) • Microorganismos patógenos²
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Carga orgánica superficial (gDBO₅/m²/d) • Carga hidráulica superficial (m³/m²/d)

¹En función de la normativa existente en el país habrá que analizar la N amoniacal

²En función de la legislación del país

6.5.2 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontales (HAFSSH)

En los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial, el agua residual discurre subterráneamente a través de un medio filtrante (grava, gravilla), por lo que no es visible, y evita la aparición de malos olores e insectos, además de cierta protección térmica.

En el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal las aguas atraviesan horizontalmente un medio filtrante, de gravilla-grava, de unos 0,6 m de espesor. A la salida de este tipo de humedales, una tubería flexible permite regular el nivel de encharcamiento dentro de humedal, que se suele mantener unos 5 cm por debajo de la superficie del medio filtrante, con lo que se impide que las aguas sean visibles.

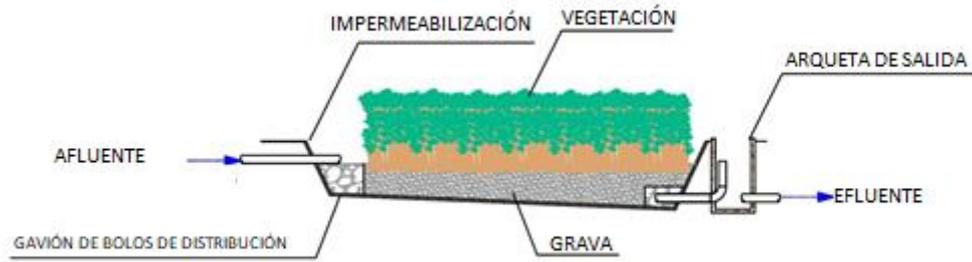


Figura 11 Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal

Tabla 11. Parámetros a evaluar en un HAFSSH

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L) • N total¹(mg/L) • P total (mg/L) • Microorganismos patógenos²
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Carga orgánica (gDBO₅/m²/d) • Profundidad media de relleno (m)

¹En función de la normativa existente en el país habrá que analizar la N amoniacal

²En función de la legislación del país

6.5.3 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Verticales (HAFSSV)

En los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical, las aguas circulan en sentido descendente a través del medio filtrante, que presenta un espesor del orden de 1 m.

En el fondo de estos humedales se dispone una red de drenaje, que permite la recogida de las aguas tratadas, hacia la zona de evacuación. Esta red, en la zona de entrada a los humedales, se conecta a unas tuberías, que ascienden en vertical, sobresaliendo del medio filtrante, y que tienen por objetivo incrementar su oxigenación por ventilación natural (Brix, 2004).

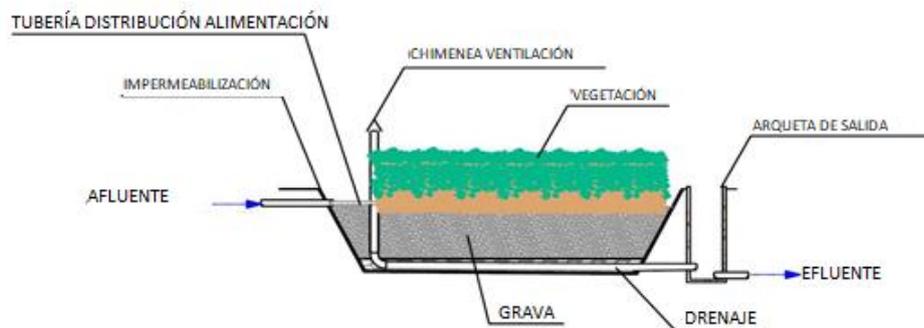


Figura 12 Humedal Artificial Vertical

Tabla 12. Parámetros a evaluar en un HAFSV

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L) • N total ¹(mg/L) • P total (mg/L) • Microorganismos patógenos²
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Carga orgánica (gDBO₅/m²/d) • Frecuencia y duración de la alimentación de agua • Altura de la lámina de agua (m)
<p>¹En función de la normativa existente en el país habrá que analizar la N amoniacal</p> <p>²En función de la legislación del país</p>	

La alimentación de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical debe efectuarse de forma intermitente, para lo que se recurre al empleo de bombes (comandados por temporizadores o boyas de nivel) o, cuando la topografía lo permite, al uso de sifones de descarga controlada. Esta intermitencia en la alimentación al humedal permite una oxigenación del sustrato filtrante más intensa que la que conlleva el aporte de oxígeno por parte de las raíces de la vegetación emergente implantada en el humedal.

6.6 LAGUNAJE

El fundamento de un sistema de laguna consiste en pasar el agua residual a tratar, tras una etapa de pretratamiento, por un conjunto de balsas dispuestas en serie y de profundidad decreciente en las que se dan de forma consecutiva condiciones anaerobias y aerobias.

Básicamente existen tres tipos de Lagunas de Estabilización: anaerobias, facultativas y de maduración.



Figura 13 Tratamiento por lagunaje con lagunas anaerobias, facultativas y de maduración

6.6.1 Lagunas anaerobias

Son lagunas profundas que operan con elevadas cargas orgánicas y que persiguen dos objetivos básicos: la reducción de la materia en suspensión (sedimentable y flotante) y la estabilización, vía anaerobia, de los lodos que se van acumulando en su fondo.

Tabla 13: Parámetros a evaluar en una Laguna anaerobia

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L)
Producción de lodos	<ul style="list-style-type: none"> • Altura de la capa de lodo acumulada en la laguna (cm) • Volumen de lodo acumulado en la laguna (m³) • Volumen de lodo producido (m³) • Frecuencia de extracción de lodos
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Carga orgánica volumétrica (gDBO₅/m³ d) • Tiempo de retención hidráulica (h) • Profundidad útil de la laguna (m) • Perfil de temperatura del agua (°C) • pH • Color del agua • Otros: presencia de espumas y flotantes

6.6.2 Lagunas facultativas

Presentan una menor profundidad y mucha más superficie que las anaerobias. El principal objetivo que se persigue es la biodegradación, vía aerobia, de la materia orgánica presente en las aguas a tratar gracias a la actividad fotosintética de las microalgas.

Tabla 14: Parámetros a evaluar en una Laguna facultativa

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L) • N total ¹(mg/L) • P total (mg/L) • Microorganismos patógenos²
Producción de lodos	<ul style="list-style-type: none"> • Altura de la capa de lodo acumulada en la laguna (cm) • Volumen de lodo acumulado en la laguna (m³) • Volumen de lodo producido (m³) • Frecuencia de extracción de lodos

Parámetros de funcionamiento

- Carga orgánica superficial de la laguna (kgDBO₅/ha d)
- Tiempo de retención hidráulica (d)
- Temperatura en la columna de agua (día y noche) (°C)
- pH
- Color del agua
- Otros: presencia de espumas y flotantes

¹En función de la normativa existente en el país habrá que analizar la N amoniacal

²En función de la legislación del país

*Es importante destacar que en el muestreo en lagunas, debido a los elevados tiempos de retención es suficiente tomar muestras puntuales, una por el día y otra por la noche

Box 6. Interpretación de colores de la Laguna (manual IWA)

Color de la laguna	Interpretación
<i>Verde oscuro y en parte transparente</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia poco importante de otros microorganismos en el efluente • Elevado pH y oxígeno disuelto • Laguna en buenas condiciones
<i>Verde amarillento o excesivamente claro</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Crecimiento de rotíferos, protozoos o crustáceos, que alimentan a las algas y pueden ocasionar su destrucción en pocos días • Si las condiciones persisten, el oxígeno disuelto disminuirá y se pueden producir malos olores ocasionalmente
<i>Grisáceo</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrecarga de materia orgánica y/o bajo tiempo de retención • La capa de lodo presenta una fermentación incompleta • No se debería seguir funcionando esta laguna
<i>Verde lechoso</i>	<ul style="list-style-type: none"> • La laguna se encuentra en un proceso de autofloculación como resultado de un elevado pH y temperatura • Se produce la precipitación de los hidróxidos de manganeso y calcio, barriendo las algas y otros microorganismos
<i>Azul verdoso</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Excesiva proliferación de cianobacterias • El excesivo crecimiento de ciertas especies forma una espuma que se descompone con facilidad, lo que lleva a emisiones de malos olores, reducción de la capacidad de penetración de la luz en la laguna, y consecuentemente, a una reducción en la producción de oxígeno
<i>Rojo pardusco</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrecarga de materia orgánica • Presencia de bacterias fotosintéticas oxidantes de sulfuros (precisan luz y sulfuros, usando CO₂ como aceptor de electrones, no producen oxígeno y no ayudan en la remoción de la DBO).

Fuente: (von Sperling & Chernicharo, 2005)

6.6.3 Lagunas de maduración

Constituyen la última etapa en el esquema de tratamiento, por lo que están sometidas a bajas cargas orgánicas y su objetivo es principalmente la reducción de patógenos. En este tipo de lagunas se establece un equilibrio entre los organismos productores de biomasa (microalgas), los consumidores (zooplancton) y los descomponedores (bacterias).

Tabla 15: Parámetros a evaluar en una Laguna de maduración

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none">• DBO₅ (mg/L) filtrado y sin filtrar• DQO (mg/L) filtrado y sin filtrar• SS (mg/L)• N total ¹(mg/L)• P total (mg/L)• Microorganismos patógenos²
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none">• Carga orgánica superficial de la laguna (kgDBO₅/ha d)• Tiempo de retención hidráulica (d)• Temperatura en la columna de agua (día y noche) (°C)• pH• Color del agua• Otros: presencia de espumas y flotantes

¹En función de la normativa existente en el país habrá que analizar la N amoniacal

²En función de la legislación del país

6.7 LOMBRIFILTROS

Los Lombrifiltros, también conocidos como Biofiltros Aeróbicos Dinámicos (BAD), constituyen una tecnología de tratamiento de las aguas residuales en la que estas aguas atraviesan, en sentido descendente, un estrato de soporte constituido por un material celulósico (virutas/aserrín de madera), que sirve para la fijación de la biomasa bacteriana implicada en los procesos de depuración, y que descansa sobre capas inferiores de gravilla y piedras. Además de la intervención bacteriana, el estrato se siembra con lombrices que van enriqueciendo la parte superior generando humus (MMAyA, 2021).

En este tipo de tratamiento no se generan lodos, sino humus, con un alto grado de estabilización de la materia orgánica presente.

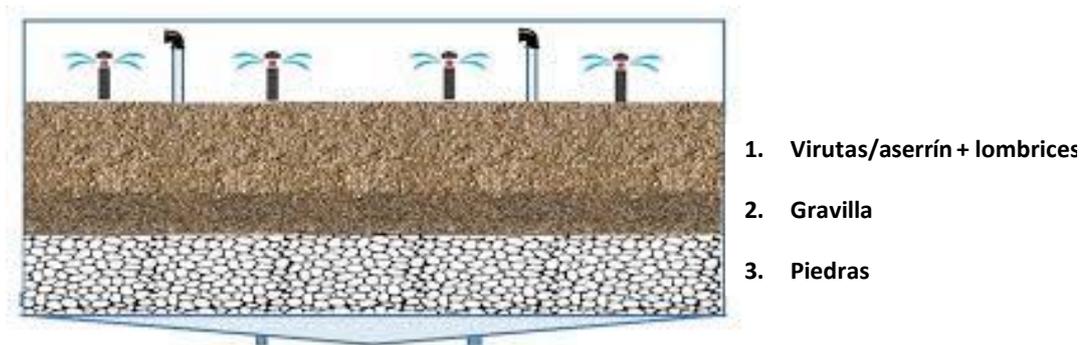


Figura 14 Esquema y sección de un Lombrifiltro (Cárdenas, 2017)

Tabla 16. Parámetros a evaluar en un lombrifiltro

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L) • N total ¹(mg/L) • P total¹ (mg/L) • Microorganismos Patógenos²
Producción de humus	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen de humus producido (m³) • Frecuencia de extracción del humus
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Carga hidráulica (m³/m²/d) • Carga orgánica superficial (g DBO₅/m²/d) • Carga orgánica superficial de sólidos en suspensión (g SST/m²/d) • Temperatura atmosférica (°C)

¹En función de la normativa existente en el país habrá que analizar la N amoniacal

² En función de la legislación del país

6.8 FILTROS PERCOLADORES

Este proceso se enmarca dentro de los sistemas de biomasa fija, y consiste en el empleo de reactores rellenos de un material soporte sobre el que se fija la biomasa bacteriana responsable de los procesos de depuración, principalmente vía aerobia (MMAyA, 2021).



Figura 15 Filtros Percoladores (PTAR El Campanario, Sucre, Bolivia)

La biopelícula, o biofilm, que se forma sobre la superficie del material de soporte va aumentando su espesor, hasta llegar a un valor límite, en el que se produce su desprendimiento, comenzando de nuevo su formación. Esta biomasa desprendida es la que se separa de las aguas tratadas, en la **etapa de sedimentación secundaria**, y constituye los lodos en exceso del proceso de tratamiento.

Tabla 17. Parámetros a evaluar en un Filtro Percolador

Rendimientos de eliminación*	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L) • N total¹ (mg/L) • P total¹ (mg/L)
Producción de lodos	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad o volumen de lodos en exceso (kg/d o m³/d) • Concentración del lodo en exceso (% materia seca) • Frecuencia de extracción de lodos
Parámetros de funcionamiento del filtro	<ul style="list-style-type: none"> • Carga orgánica (KgDBO₅/m³ d) • Carga hidráulica a caudal medio y a caudal máximo (m/h) • Tasa de recirculación a caudal medio, en su caso • Caudal de recirculación medio y máximo (m³/h), en su caso • Régimen de lavado: Carga hidráulica (m/h); tiempo de duración (min.); número de veces que se realiza un lavado al día; en el caso de que la alimentación se realice mediante brazos giratorios, fuerza de lavado (mm) • En el caso de que la alimentación se realice mediante sifón, frecuencia de la alimentación
Parámetros de funcionamiento de la decantación secundaria	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad ascensional a caudal máximo (m/h) • Tiempo de retención hidráulico a caudal máximo (h) • Carga sobre vertedero a caudal máximo (m³/h/m)
Consumo energético	<ul style="list-style-type: none"> • Recirculación, en su caso (kWh)

¹En caso de que el proceso esté diseñado para llevar a cabo eliminación de nutrientes. En función de la normativa existente en el país habrá que analizar N amoniacal.

*Es importante tener en cuenta que los datos de rendimientos deben ser tomados a la salida del decantador

6.9 CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS

La tecnología de tratamiento de las aguas residuales conocida como Contactores Biológicos Rotativos (CBR), se encuadra dentro de los procesos de biomasa fija, y consiste en un material de soporte, que gira semisumergido (aproximadamente el 40%) en una cuba, que contiene el agua residual a depurar (MMAyA, 2021).

Al igual que en el caso de los filtros percoladores, la biomasa desprendida del material de soporte, que constituye los lodos en exceso del proceso depurador, se separa de efluente tratado en la etapa de sedimentación, que sigue al tratamiento biológico.

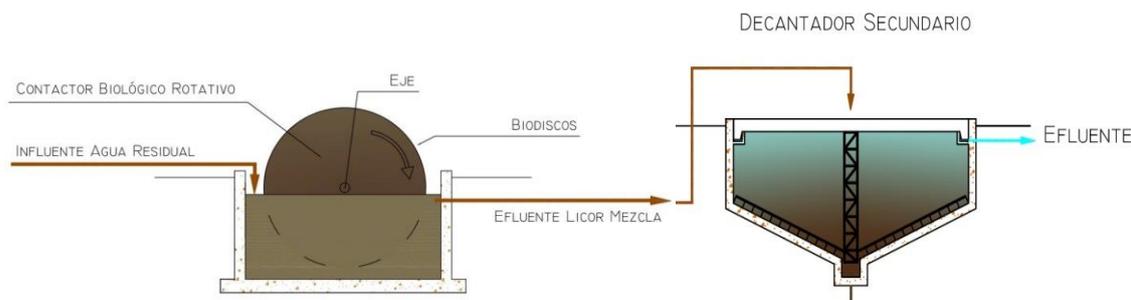


Figura 16 Esquema de un CBR)

Tabla 18. Parámetros a evaluar en un CBR

Rendimientos de eliminación*	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L) • Microorganismos patógenos • N total¹(mg/L) • P total¹ (mg/L)
Producción de lodos	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad o volumen de lodos en exceso (kg/d o m³/d) • Concentración del lodo en exceso (% materia seca) • Frecuencia de extracción de lodos
Parámetros de funcionamiento del filtro	<ul style="list-style-type: none"> • Carga orgánica por superficie de soporte (gDBO₅/m² d) • Tiempo de retención hidráulico a caudal máximo (h) • Velocidad de giro (rpm) • Caudal de recirculación (m³/d), en su caso
Parámetros de funcionamiento de la decantación secundaria	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad ascensional a caudal máximo (m/h) • Tiempo de retención hidráulico a caudal máximo (h) • Carga sobre vertedero a caudal máximo (m³/h/m)

¹En caso de que el proceso esté diseñado para llevar a cabo eliminación de nutrientes. En función de la normativa existente en el país habrá que analizar N amoniacal.

*Es importante tener en cuenta que los datos de rendimientos deben ser tomados a la salida del decantador.

6.10 LODOS ACTIVADOS

El proceso de lodos activados puede entenderse como la reproducción de los procesos de autodepuración aerobia que se producen en las aguas continentales, mediante un sistema industrial.



Figura 17 Aireación Extendida (PTAR de Cambados, España)

En el proceso pueden distinguirse dos etapas claramente diferenciadas: la oxidación biológica, que tiene lugar en el reactor biológico, y la separación sólido-líquido, que tiene lugar en el decantador secundario (Del Río, 2019).

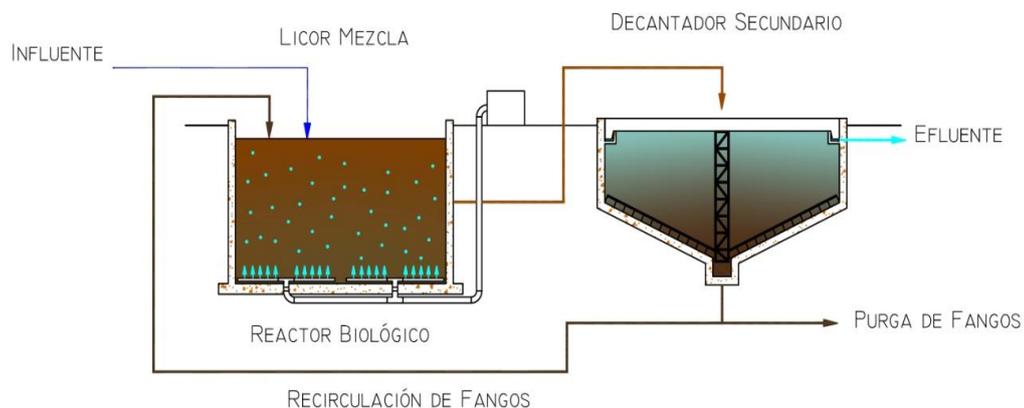


Figura 18 Esquema de un proceso de Lodos Activados

En la actualidad existen muchas variantes del proceso, según los parámetros y el régimen de funcionamiento, el tipo de cuba, la configuración del proceso, etc.:

- Alta carga (etapa A en proceso A-B), media carga, baja carga (nitrificación o nitrificación-desnitrificación), aireación prolongada
- Procesos con reactor y decantador: Reactor convencional; con cámaras alta carga, anóxicas, anaerobias, facultativas; canal de oxidación
- Proceso secuencial

Tabla 19. Parámetros a evaluar en lodos activados

Rendimientos de eliminación¹	<ul style="list-style-type: none"> • DBO₅ (mg/L) • DQO (mg/L) • SS (mg/L) • N total²(mg/L) • P total² (mg/L)
Producción de lodos	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad o volumen del lodo en exceso (kg/d o m³/d) • Concentración del lodo en exceso (% materia seca)
Parámetros de funcionamiento del reactor	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de retención en el reactor (h) • Oxígeno disuelto en el reactor (mg/L) • Cantidad de sólidos en el reactor (concentración MLSS y MLSSV, si es posible) • Edad del lodo (tiempo de retención celular) (d) • Carga másica (kg DBO₅/d) • Caudal de recirculación de lodos (m³/d) y concentración • Caudal de recirculación interna, hubieren su caso (m³/d) • En el caso de reactores secuenciales, tiempo de duración de las etapas en cada tipo de funcionamiento (h) • Aire introducido (Nm³/h)
Parámetros de funcionamiento de la decantación secundaria	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad ascensional a caudal máximo (m/h) • Tiempo de retención hidráulico a caudal máximo (h) • Carga sobre vertedero a caudal máximo (m³/h/m)
Consumos energéticos	<ul style="list-style-type: none"> • Aireación (kWh) • Recirculación

¹ Es importante tener en cuenta que los datos de rendimientos deben ser tomados a la salida del decantador

² En caso de que el proceso esté diseñado para llevar a cabo eliminación de nutrientes. En función de la normativa existente en el país habrá que analizar N amoniacal. En procesos de baja carga y en aireación prolongada es necesario medir el N para poder hacer los balances. En estos procesos también es conveniente medir nitratos.

6.11 TRATAMIENTOS DE DESINFECCIÓN

El objetivo concreto de la desinfección es la eliminación de aquellos microorganismos que son susceptibles de generar enfermedades tales como bacterias, virus, protozoos y helmintos.

6.11.1 Cloración

La Cloración constituye el método de desinfección de las aguas residuales tratadas más ampliamente empleado a nivel mundial, destruyendo los organismos patógenos por oxidación de su material celular (MMAyA, 2021).

El cloro se puede aplicar al agua, principalmente, en forma de: cloro gas, dióxido de cloro, hipoclorito cálcico e hipoclorito sódico.

Dentro del proceso de cloración será necesario evaluar:

Tabla 20. Parámetros a evaluar en un proceso de cloración

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • Microorganismos patógenos¹
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Dosificación de cloro en la forma administrada (ej. Hipoclorito de sodio) (mg/L) • Tiempo de contacto (min) • Cloro residual (mg/L) • pH • DBO₅ y Amonio de entrada (mg/L) • SS a la entrada (mg/L)

¹En función de la legislación del país

6.1.1.2 Radiación UV

En los procesos de desinfección mediante la aplicación de radiación, lo habitual es recurrir a la aplicación de luz ultravioleta (UV), que forma parte del espectro electromagnético en el rango de longitudes de onda que abarca desde los 100 a los 400 nanómetros (nm), y que queda comprendido entre la luz visible y los rayos X. Al ser expuestas las células a radiación UV-C, se daña su ADN, lo que impide su replicación (MMAyA, 2021).

Tabla 21: Parámetros a evaluar en un proceso de Radiación UV

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • Microorganismos patógenos¹
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Dosis de radiación UV aplicada (mJ/cm², mW.s/cm²) • Tiempo de exposición (segundos) • pH • Materia en suspensión (SS) a la entrada • Presencia de Manganeso y Hierro (mg/L)

¹En función de la legislación del país

6.1.1.3 Desinfección con tratamientos extensivos

Como se ha visto con anterioridad, las lagunas de maduración tienen el objetivo de la eliminación de microorganismos patógenos (ver apartado 6.6.3).

Asimismo, los humedales artificiales de flujo superficial son procesos efectivos para la reducción de patógenos (ver apartado 6.5.1).

6.12 TRATAMIENTOS DE LODOS

Los objetivos del tratamiento de lodos son:

- Reducir el volumen ocupado por los lodos, mediante su concentración y la eliminación parcial del agua que contienen.
- Estabilizar los lodos para evitar problemas de fermentación y putrefacción.
- Conseguir una textura de los lodos que los haga manejables y faciliten su transporte.
- Eliminar la mayor parte de los organismos patógenos presentes en los lodos para posibilitar su reuso, minimizando los riesgos sanitarios.

6.12.1 Producción de lodos

La cantidad de los lodos producidos en el tratamiento de las aguas residuales depende de la concentración de los sólidos sedimentables presentes en ellas, del grado de contaminación biodegradable que entra diariamente a la PTAR (dado que la mayor parte de esta contaminación se transforma biológicamente en lodos) y del tipo de tratamiento al que se someten las aguas residuales (MMAyA, 2021).

Será necesario recopilar los siguientes datos:

- Producción de los **lodos primarios sin estabilizar** (decantación): volumen (m³/d) y peso seco (kg MS/d)
- Concentración de sólidos en los lodos primarios sin estabilizar (% materia seca)
- Producción de los **lodos estabilizados** (tanque Imhoff, fosa séptica, RAFA, FAFA, lagunajes): volumen (m³/d) y peso seco (kg MS/d)
- Concentración de sólidos en los lodos estabilizados (% materia seca)
- Producción de los **lodos secundarios sin estabilizar** (FP, CBR, Lodos Activados): volumen (m³/d) y peso seco (kg MS/d)
- Concentración de sólidos en los lodos secundarios sin estabilizar (% materia seca)
- Producción de humus, en el caso de los lombrifitros (m³/d)

Box 7. Frecuencias de descarga de lodos en función de su procedencia

Las frecuencias de descarga de los lodos para su posterior tratamiento dependen en gran medida de la tipología del proceso de cual provengan dichos lodos. La siguiente tabla ilustra cuales son las frecuencias de descarga más típicas por proceso.

Tipología/procedencia de los lodos	% de materia seca del lodo	Frecuencia de descarga de los lodos
<i>Aireación Extendida sin espesamiento</i>	1	En continuo (a diario)
<i>Aireación Extendida con espesamiento</i>	3	En continuo (a diario)
<i>Tanques Imhoff/RAFA</i>	5	Una descarga cada 1-3 meses
<i>FAFA</i>	5	Una descarga cada 4-6 meses

Lagunas Anaerobias y Facultativas

7⁽¹⁾

Una descarga cada 5-10 años

⁽¹⁾ Este porcentaje de materia seca se corresponde con el caso de que los lodos de las lagunas se extraigan por bombeo. Si los lodos se extraen de las lagunas tras proceder a su vaciado, el porcentaje de materia seca alcanza el 10%

Fuente: (MMAyA, 2021)

6.12.2 Espesamiento de los lodos

Dentro de la línea de lodos, el espesamiento es el proceso cuyo objetivo es reducir el volumen de estos residuos, mediante su concentración por eliminación parcial del agua que contienen (Sobrados, 2019)

Existen tres procesos básicos de espesamiento:

- **Espesamiento por gravedad.** La concentración del lodo se obtiene por acción exclusiva de la fuerza de gravedad. El espesador por gravedad actúa de una forma similar a un sedimentador primario, y pueden ser estáticos o dinámicos (provistos de rasquetas de fondo)



Figura 19 Espesador por gravedad estático

- **Espesamiento por flotación.** Mediante la aportación de microburbujas de aire, que se adhieren a los lodos, se logra que su densidad sea inferior a la del agua, retirándose los lodos concentrados por la parte superior del espesador.

Tabla 22. Parámetros a evaluar en un proceso de espesamiento de lodos

Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de lodo: primario, secundario o mixto; fresco o digerido • Carga superficial de sólidos (Kg/m².d) • Tiempo de retención del agua a caudal medio (h) • Tiempo de retención de los sólidos (d) • Caudal diario de los lodos espesados (m³/d) • Concentración de los lodos espesados (% materia seca) • Relación Aire/ sólido, en caso de espesamiento por flotación
-------------------------------------	--

6.12.3 Estabilización de lodos

La estabilización de los lodos en exceso, que se generan en los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales urbanas, tiene como objetivo básico disminuir la componente orgánica de los mismos, con el fin de minimizar el riesgo de que se originen procesos de putrefacción (MMAyA, 2021).

La estabilización puede realizarse mediante diferentes procesos. Los más comunes son los siguientes:

- **Estabilización con cal.** Se basa en el incremento de pH para inactivar, tanto a los procesos biológicos que generan malos olores, como a los organismos patógenos presentes.

Tabla 23. Parámetros a evaluar en un proceso de estabilización de lodos con cal

Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de lodo: primario, secundario o mixto; fresco o digerido • Materia volátil (% de reducción de sólidos volátiles) • Temperatura (°C) • pH y Tiempo de contacto (h) • Dosis de cal (kg de CaO/kg de sólidos)
-------------------------------------	---

- **Digestión aerobia.** Se basa en la oxidación de parte de la materia orgánica presente en los lodos, por la acción de microorganismos y con presencia de oxígeno.

Tabla 24. Parámetros a evaluar en un proceso de digestión aerobia de lodos

Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de lodo: primario, secundario o mixto; fresco o digerido • Materia volátil (% de reducción de sólidos volátiles) • Temperatura (°C) • Tiempo de retención (d) • Aporte de oxígeno
-------------------------------------	--

- **Digestión anaerobia.** Se basa en un complejo proceso microbiológico, que permite una importante degradación de la materia orgánica presente en los lodos a través de procesos de fermentación que transcurren en recintos cerrados y en ausencia de oxígeno, dando lugar a la generación de biogás.

Tabla 25. Parámetros a evaluar en un proceso de digestión anaerobia de lodos

Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Carga de Sólidos Volátiles • Materia volátil (% de reducción de sólidos volátiles) • pH • Temperatura (°C) • Alcalinidad total (mg CaCO₃/L) • Alcalinidad debida a las sales de AGV (mg CaCO₃/L) • Relación AGV/alcalinidad • Tiempo de retención (d) • Verificación de que los equipos de agitación funcionan de acuerdo a los diseños de la tecnología específica.
Producción de biogás	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de metano en el gas producido (% CH₄) • Volumen de gas producido en condiciones normales (Nm³/d)

Cuando la digestión se lleva a cabo en pequeños digestores que, generalmente, no están equipados con sistemas de agitación y mezcla; los reactores suelen estar abiertos, aunque pueda formarse una cubierta vegetal. Dadas las cantidades de lodo tratadas y las condiciones en que tiene lugar el proceso, la cantidad de gas producido diariamente es mucho menor que en el caso de un digestor anaerobio convencional, por lo que no suele ser recogido. Así, los parámetros a evaluar en este caso serán:

- pH
- Tiempo de retención (d)
- Temperatura (°C)

6.12.4 Deshidratación

El proceso de deshidratación del fango o lodo consiste en reducir la cantidad de agua presente en los mismos, distinguiéndose dos alternativas básicas: el secado mecánico y el secado natural (MMAyA, 2021).

Los principales procesos de deshidratación son:

- **Sistemas de deshidratación natural:** La deshidratación natural se lleva a cabo mediante procesos físicos naturales como son la acción del sol y el viento. Entre los sistemas naturales se encuentran los lechos de carrizo, los sacos de secado, humedales artificiales y las eras de secado.

Las eras de secado son sistemas de deshidratación de lodos están conformados por un lecho relleno de material filtrante, en cuya superficie se deposita el lodo, produciéndose su secado por el drenaje del agua a través de la propia masa del lodo y del medio filtrante, y por la evaporación del agua a través de toda superficie del lodo expuesta al aire.



Figura 20 Lechos de secado (PTAR EL Abra, Bolivia)

Tabla 26. Parámetros a evaluar en una deshidratación natural del lodo

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración de los lodos a deshidratar (% Materia seca) • Sequedad del lodo deshidratado (% Materia seca)
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Duración del ciclo de secado (d) (tiempo de descarga de lodos, tiempo de secado, tiempo de retirada de los lodos secos) • Frecuencia de descarga de los lodos • Caudal de los lodos a secar (m³/d) • Espesor de la capa de lodo a secar (cm) • Carga superficial de sólidos (kg m.s./m²/año) • Características ambientales: clima húmedo o seco, pluviometría • Presencia/ausencia de cubierta • Distancia máxima de transporte para la remoción del lodo seco (m)

- **Sistemas de deshidratación mecánica.** En este caso, la deshidratación tiene lugar por procesos físicos de centrifugación o filtración. Los sistemas más típicos de deshidratación mecánica son los filtros de vacío, tornillos, filtros banda y centrifugas. Estas últimas, producen la deshidratación del lodo mediante la aplicación de fuerzas centrífugas que permite la separación de la fase líquida y sólida presente en el lodo.

Tabla 27. Parámetros a evaluar en una deshidratación mecánica del lodo

Rendimientos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de lodo: primario, secundario o mixto; fresco o digerido • Concentración de los lodos a deshidratar (% Materia seca) • Sequedad del lodo deshidratado (% Materia seca)
Parámetros de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Caudal de lodos a deshidratar (m³/h) • Carga de sólidos de alimentación (kg SS/h) • Tiempo de funcionamiento (número de horas al día y días por semana) • Consumo de polielectrolito (kg/tn MS), en su caso
Características del escurrido	<ul style="list-style-type: none"> • DQO (mg/L) • SS (mg/L) • N total (mg/L)

6.13 LÍNEA DE GAS

Algunos de los procesos de tratamiento, como se ha visto con anterioridad, generan como subproducto un gas combustible llamado biogás (tratamientos anaerobios de lodos, Reactores anaerobios de flujo superficial, etc.).

Este biogás generado puede ser aprovechado energéticamente mediante calderas, motores de combustión interna o turbinas, o bien directamente enviado a quemadores para su combustión (control de emisiones a la atmósfera)

En estos casos será necesario recopilar, como mínimo, datos a cerca de:

- Volumen de biogás empleado (Nm³/d)
- Volumen de gas quemado en antorcha (Nm³/d), en su caso
- % CH₄ en el biogás
- Problemas relacionados con la presencia de sulfuro

7 BALANCES DEL PROCESO DE TRATAMIENTO

Además de verificar los rendimientos en cada prueba concreta y con los datos de que se disponga, es conveniente realizar balances de masa de los diferentes procesos con objeto de confirmar el funcionamiento o prever problemas, fugas o acumulaciones de lodo que se estén produciendo.

Una vez elaborado el balance de masa para cada proceso, tanto de la línea de agua como de lodo, sería adecuado realizar un balance global de la planta y plasmarlo en un diagrama que abarque toda la instalación, interconectando los distintos procesos que compongan el tren de tratamiento.

Adicionalmente, sería interesante también poder realizar el balance de componente para los parámetros más relevantes, como podrían ser la materia orgánica o los nutrientes y, al igual que para los balances de masa, plasmarlos en un diagrama.

Este tipo de ejercicio donde se pueden ver los resultados de las pruebas ya con un foco general, además de resultar muy ilustrativo del trabajo realizado, también es muy útil de cara a identificar errores o incoherencias.

8 REFERENCIAS

- Brix, H. (2004). *Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage. Vol. 1.* 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control.
- Chernicharo, C., & Bressani, T. (2021). Elementos de diseño, construcción y operación de Reactores UASB para el tratamiento de Aguas Residuales Municipales. *Talleres de Conocimiento de Aguas Residuales*. Ecuador: Talleres BID.
- Coruña, U. d. (2013). Decantación Lamelar. *Fichas Técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil*.
- Del Río, I. (2017). Marco legal de la depuración. En CEDEX. *Curso iberoamericano de tratamiento de aguas residuales urbanas, II Edición*.
- Del Río, I. (2019). Tratamiento biológico mediante fangos activados. Aspectos Generales y procesos convencionales. En CEDEX, *XXXVII Curso sobre Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de estaciones depuradoras*. CEDEX.
- MARM. (2010). *Manual para la implantación de sistemas de depuración de pequeñas poblaciones*.
- MMAyA. (2021). *Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales*.
- Sobrados, L. (2019). Sistemas de espesamiento. En CEDEX, *XXXVII Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras*.
- Von Sperling, M., & Chernicharo, C. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climates Regions*. London: IWA Publishing.

ANEXO I: PARTE DE CONTROL

Durante la realización de las pruebas, el personal a cargo de las mismas, deberá rellenar una **ficha de registro de datos**, en donde deberá figurar al menos la siguiente información:

- Nombre de la PTAR
- Fecha de toma de datos
- Ubicación de los equipos de muestreo y/o medidores que se instalen
- Ubicación y hora de realización de los muestreos puntuales de agua residual
- Ubicación y hora de realización de las mediciones puntuales, así como el resultado de las mismas
- Hora de inicio y de fin de toma de muestra en los equipo de toma de muestras automáticos

La ubicación de los equipos y el lugar donde se toman muestras puntuales o se hacen mediciones debe estar claramente indicada, preferentemente en un plano detallado de la PTAR. Si se han tenido que tomar precauciones para ubicar dentro de la cámara la toma de muestras, especificar e, incluso, incluir un croquis.

A su vez cada muestra tomada y cada medición realizada deberán estar claramente identificadas, de acuerdo al protocolo de muestreo establecido previamente, con el fin de evitar errores posteriores en la interpretación de los datos. Se debe establecer un código para etiquetar las muestras.

Esta ficha de registro de datos incluirá un apartado de observaciones general y otro relativo a cada unidad de proceso, donde se resaltarán todos aquellos aspectos que puedan resultar de interés en relación con el funcionamiento del proceso, por ejemplo el color del agua en el caso de las lagunas, la presencia de moscas en el caso de los lechos bacterianos, indicar si ha habido lluvia durante las horas previas a la toma de muestra y con qué intensidad, si el aliviadero de la entrada a la PTAR está abierto, etc. Estos aspectos, a los que se deberá prestar atención durante la realización de las pruebas, dependerán del tipo de proceso y deberán estar especificados en el protocolo de pruebas de la PTAR.

Las fichas de registro deberán, en lo posible, ir acompañadas con fotografías de las distintas partes del proceso, que deberán realizarse el primer día de la campaña y posteriormente cuando se detecten cambios apreciables visualmente.

Además todos los resultados de los análisis y mediciones realizadas, indicados en el apartado anterior, se reflejarán diariamente en un **parte de control** que en todo momento estará disponible para su revisión.

Este parte será rellenado diariamente por personal formado para ello. Los datos reflejados en la ficha de registro y en el parte de control servirán de base para el cálculo de los rendimientos y el estudio de funcionamiento de las instalaciones a efectos de la evaluación, al menos durante la etapa de pruebas de Funcionamiento.

El parte tendrá un apartado denominado “Incidencias”, donde se anotarán todos los problemas y anomalías que se produzcan en el funcionamiento de las PTAR, reseñando las paradas, averías y puestas en marcha, parciales o totales, así como los elementos que requieran reparación o sustitución.



MINISTERIO
DE ASUNTOS EXTERIORES, UNIÓN EUROPEA
Y COOPERACIÓN

