

10. Control analítico: muestreos y determinaciones

INTRODUCCION

En este capítulo describimos la labor de seguimiento mínima necesaria para conseguir una evaluación adecuada del comportamiento de las lagunas de estabilización. Los seguimientos experimentales de las plantas de lagunaje son muy importantes por tres razones fundamentales:

- a) Conocer la eficacia de la depuración en distintas épocas del año y en los distintos aspectos relativos a la calidad del efluente para sus posibles usos.
- b) Detectar anomalías de funcionamiento y tomar medidas de corrección adecuadas para evitarlas.
- c) Reunir datos representativos de la depuración por lagunaje en la zona, que servirán a su vez para mejorar los criterios de diseño y construcción de futuras instalaciones.

Los seguimientos que aconsejamos se basan en la experiencia reunida en lagunas de estabilización que operan en España en diferentes condiciones climáticas. Estos seguimientos están orientados específicamente a plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas, y habrían de modificarse en el caso de lagunaje de vertidos industriales.

Para evaluar el comportamiento de las lagunas de estabilización es necesario reunir información precisa relativa a su configuración física y llevar a cabo muestreos perió-

dicos y determinaciones analíticas que permitan conocer la evolución en la calidad del agua almacenada a lo largo del tratamiento.

Las determinaciones a realizar deben variar ligeramente según cuál sea el destino final del efluente, y adaptarse también a posibles incidencias en las lagunas.

DESCRIPCION FISICA DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACION

La descripción de la planta de tratamiento por lagunaje debe incluir como mínimo la información siguiente:

a) Situación:

1. Latitud y longitud, y a ser posible la ubicación sobre mapa.
2. Altitud.
3. Descripción geográfica de la zona.
4. Población (incluyendo la carga tratada en unidades de población equivalente, calculada utilizando una media de 50 g DBO₅/habitante.día, así como la presencia, naturaleza y cantidad de vertidos industriales). Es muy importante que el operario registre cualquier variación que no se haya tenido en cuenta a la hora del diseño, ya que esta información es fundamental a la hora de interpretar los resultados experimentales que se vayan recogiendo.
5. Datos climáticos (medias mensuales y anuales, nombre y situación de los Observatorios Meteorológicos más próximos).

b) Características de la instalación:

1. Número de lagunas y su disposición en serie o paralelo. Hay que incluir también la información relativa a las conexiones entre lagunas, arquetas de reparto, flexibilidad de la distribución de caudales entre las distintas lagunas, posibilidad de recirculación, etc.
2. Tipos de lagunas: Anaerobias, facultativas, maduración, profundas, continuas, discontinuas, con vegetación flotante o emergente, con peces, etc.
3. Pretratamiento: Rejas de gruesos y finos, desarenadores, desengrasadores, sedimentadores.
4. Medidores de caudal.
5. Tratamientos complementarios: Eliminación de algas, cloración, etc.
6. Destino final del efluente: Descarga en cursos de agua, reutilización en riego, infiltración en el subsuelo.
7. Historia de la planta: Fecha de construcción y puesta en marcha, modificaciones posteriores.

TABLA 10.1
Descripción física de la planta de tratamiento por lagunas

<p>Situación</p> <ul style="list-style-type: none"> - Latitud - Longitud Altura sobre el nivel del mar. - Zona geográfica - Población servida (hab-equivalentes) <ul style="list-style-type: none"> ● Efluentes urbanos ● Efluentes industriales. <p>Características de la planta</p> <ul style="list-style-type: none"> - Número de lagunas - Disposición en serie o paralelo (esquema) - Tipos de lagunas - Elementos de pretratamiento - Medidores de caudal - Tratamientos complementarios - Destino final del efluente <ul style="list-style-type: none"> ● Vertido a río, embalse o mar, ● Reutilización ● Infiltración en el subsuelo. - Historial de la planta. <p>Características de las lagunas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones - Tipo de impermeabilización - Acabado de taludes - Entradas y salidas <ul style="list-style-type: none"> ● Profundidad. ● Posición - Datos de diseño <ul style="list-style-type: none"> ● Caudal ● Carga orgánica. - Datos experimentales
--

c) Características de las lagunas:

- 1 Dimensiones: Longitud de los lados en superficie y fondo, área de superficie y fondo, taludes, profundidad, altura de agua, forma de las lagunas
- 2 Impermeabilización: Lámina de plástico (caucho butírico, polietileno, PVC), arcilla
- 3 Protección de los taludes y orillas Escollera, hormigón. Indicar la presencia de erosión.
- 4 Estructuras de entrada y salida Descarga del influente por encima o debajo de la superficie del agua, profundidad de la toma del efluente, situación de alimentación y salida, posibilidad de salida a profundidad variable.
- 5 Caudal y carga orgánica de diseño, caudal y carga orgánica reales; tendencia a lo largo de los años de operación

6. Antecedentes sobre calidad de influente y efluente: Datos disponibles y su procedencia, análisis efectuados, fechas de muestreo.

7. Normalmente, muchos de estos datos pueden extraerse de los proyectos de las plantas, a los que el operario debe siempre tener acceso. Siempre que sea posible, es también conveniente disponer de planos de la instalación y diagramas de flujo.

MUESTREOS: METODOLOGIA

La aplicación de técnicas de muestreos correctas es fundamental en cualquier seguimiento de lagunas de estabilización. De hecho, gran cantidad de estudios de lagunas producen resultados prácticamente inutilizables debido a que las técnicas de muestreo aplicadas han sido defectuosas. A continuación veremos algunas de las consideraciones a tener en cuenta en relación con los distintos tipos de muestreos, y su frecuencia.

Tipos de muestras

Los tres tipos fundamentales de muestras que pueden tomarse en una laguna de estabilización son los siguientes:

1. Muestras puntuales. Son muestras simples, tomadas en un solo punto de los estanques y en un solo momento del día. Por ejemplo, para tomar una muestra puntual del efluente de la planta tendríamos simplemente que llenar un recipiente con el agua de salida.

En este tipo de muestras es importante registrar cuidadosamente la localización del punto de muestreo y la hora del día a la que se llevó a cabo la toma de muestras. Las muestras puntuales informan sobre el estado de la parte de la instalación muestreada en ese punto y ese momento, por lo que sólo tienen valor con respecto a aquellas variables que no sufren grandes variaciones durante el transcurso del día o la posición en el estanque.

2. Muestras compuestas. A diferencia de las muestras puntuales, estas muestras proporcionan información sobre la media diaria de las variables que se analizan.

Para tomar una muestra compuesta hay que combinar varias muestras puntuales tomadas a diferentes horas del día, mezclándolas en proporción directa al caudal que representan. Por ejemplo, para tomar muestras compuestas a la entrada de la planta habría que tomar muestras puntuales de agua residual a intervalos regulares de una-dos horas, y medir simultáneamente con cada toma de muestras puntual el caudal de entrada a la planta. A continuación se mezclarían estas muestras puntuales de forma que la cantidad de cada una de ellas que aparece en la muestra final sea directamente proporcional al caudal medido en el momento en que se tomó la muestra puntual correspondiente. La tabla 10.2 presenta los valores del caudal medido a cuatro horas distintas a la entrada de una depuradora:

TABLA 10.2
Medidas del caudal a distintas horas del día

Caudal, m ³ /h	60	90	100	50
Horas del día.	9	12	15	18

Supongamos que tenemos que tomar una muestra compuesta del agua residual que entra en la depuradora. Para ello tomamos una muestra simple del agua de entrada a cada una de las horas especificadas en la tabla. Cada vez tomamos, por ejemplo, un litro de muestra. El número de muestras simples debe ser de al menos cuatro espaciadas regularmente como en este ejemplo. Cuanto mayor sea el número de muestras, tanto más representativa será la muestra final obtenida.

Una vez hemos tomado todas las muestras simples, para determinar en qué proporción deben mezclarse para obtener la muestra compuesta se elige el valor más bajo de los caudales medidos. En nuestro ejemplo el valor más bajo sería 50 m³/h, correspondiente a las seis de la tarde (muestra 4). Tomamos este valor como referencia, y obtenemos la proporción en que deben estar representados todos los demás en la muestra final en relación a él:

Muestra de las 9 de la mañana (1): $60/50 = 1,2$.

Muestra de las 12 del mediodía (2): $90/50 = 1,8$.

Muestra de las 3 de la tarde (3): $100/50 = 2$.

Es decir, que si queremos obtener aproximadamente un litro de muestra compuesta, podemos tomar 200 cm³ de la muestra 4, y añadirle:

Muestra 1: $200 \times 1,2 = 240$ cm³.

Muestra 2: $200 \times 1,8 = 360$ cm³.

Muestra 3: $200 \times 2 = 400$ cm³.

En total obtendremos $(240 + 360 + 400 + 200) = 1.200$ cm³. Siempre es preferible manejar números redondos de volumen, como los de este ejemplo, y luego tirar el exceso de muestra.

En ocasiones las plantas de depuración por lammaje disponen de muestreadores automáticos que toman las muestras a intervalos regulares, almacenan estas muestras, y al final del día las mezclan en las proporciones adecuadas para obtener una media diaria representativa de la carga que realmente se aplica a la depuradora. Desgraciadamente estos muestreadores automáticos no son muy comunes, por lo que hay que recurrir a la toma manual de muestras puntuales, seguida por la mezcla para obtener la muestra compuesta.

Cuando debido a limitaciones en tiempo o mano de obra no es posible la toma de muestras durante períodos de veinticuatro horas a intervalos de una-dos horas, hay que intentar por lo menos la toma de muestras durante las horas de luz, separadas como máximo por intervalos de tres horas.

Aunque este procedimiento de toma de muestras es mucho más tedioso que las muestras puntuales, es la única forma de conseguir información válida sobre algunos aspectos de las lagunas, especialmente la alimentación. Si se toman únicamente muestras puntuales se corre el riesgo de detectar máximos o mínimos que no son representativos de la marcha real de la instalación, y todas las evaluaciones basadas en ellos serán necesariamente erróneas.

3. Muestras promedio en profundidad. Como hemos visto en los capítulos anteriores, algunas de las variables más importantes en las lagunas (oxígeno disuelto, algas) presentan cambios muy importantes de concentración en función de la profundidad del estanque a la que se toma la muestra. En estos casos, una estimación adecuada de la variable en cuestión tiene que ir acompañada de la profundidad a la que se verificó la medida.

De igual forma, para el conjunto del estanque hay que suministrar un valor medio que represente dicha variable para la totalidad de la columna de agua. Esto se consigue tomando muestras a varias profundidades y obteniendo la media de los resultados obtenidos. Esta media debe hacerse teniendo en cuenta que el volumen de agua representado por cada profundidad varía en función del talud, siendo máximo en superficie y mínimo en el fondo.

Frecuencia de los muestreos

Con objeto de determinar el comportamiento de las lagunas durante las épocas del año en las que su eficacia es máxima y mínima, se recomienda escoger dos períodos de muestreos que correspondan a los meses más fríos y cálidos.

Los muestreos deben llevarse a cabo con periodicidad semanal durante al menos cinco semanas situadas en la zona central de la época seleccionada (por ejemplo, en enero-febrero y julio-agosto). Aunque normalmente es mejor realizar los muestreos entre semana para detectar mejor los vertidos industriales, en zonas turísticas con gran afluencia de visitantes los fines de semana es conveniente incluir también muestreos durante esos días. Por tanto, al diseñar el programa de muestreos hay que tener en cuenta los condicionantes locales que puedan influir en los vertidos de aguas residuales.

Este sistema de dos campañas anuales de muestreo debe tomarse como el mínimo necesario para la evaluación del comportamiento de las lagunas. Siempre que sea posible, y se cuente con los medios necesarios para un seguimiento más completo, es preferible la toma de muestras mensual, complementada con las dos campañas anuales descritas en el párrafo anterior.

Medidas de caudal

La medida del caudal tiene una importancia decisiva para evaluar el comportamiento de las lagunas. No sólo es necesaria para obtener muestras compuestas, sino también para determinar el tiempo de retención del agua en la planta, la carga superficial y volumétrica y la capacidad de tratamiento de la instalación.

Normalmente existe siempre un medidor de caudal a la entrada de la planta. El

tipo más habitual es el canal Parshall, cuyo principio de funcionamiento se describe en el capítulo 4. Algunas plantas cuentan con dos medidores de caudal, uno a la entrada y otro a la salida. Disponer de estas dos medidas es muy conveniente, ya que de esa forma se pueden calcular las pérdidas por evaporación e infiltración en el terreno.

CONTROL OPERATIVO DE LAS LAGUNAS: INSPECCION DIARIA

Además de las determinaciones analíticas que veremos a continuación, el operador de la planta de tratamiento debe efectuar un control diario de las incidencias de las lagunas, con objeto de detectar lo antes posible cualquier problema de funcionamiento y poder así tomar las medidas correctoras correspondientes antes de que se produzcan fallos en la depuración.

Este control diario es muy sencillo y se limita a las observaciones que pueden reunirse durante un paseo alrededor de la instalación, que debe realizarse en forma rutinaria a la misma hora del día. Si no es posible efectuar esta inspección diariamente, por lo menos hay que llevarla a cabo una vez a la semana.

Durante esta inspección visual, el operador debe tomar notas relativas a las incidencias siguientes:

- Aparición de espumas y flotantes en distintos puntos de las lagunas. Esta condición puede indicar la presencia de concentraciones elevadas de detergentes en las aguas, y resulta perjudicial para la marcha general de la depuración.

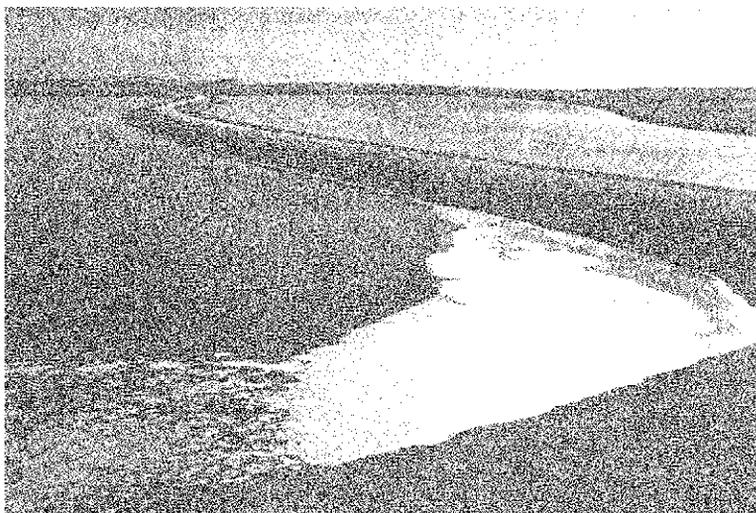


Foto 10.1. Espumas en lagunas facultativas.

Acumulación de grasas en las lagunas, aspecto de estas manchas y localización en los estanques. Las películas de grasa en superficie previenen la aireación a través de la interfase y bloquean la entrada de luz en las lagunas, por lo que conviene retirarlas cuanto antes.

- Desprendimiento de fangos desde el fondo de los estanques y acumulación de éstos en la superficie. Esta incidencia también es indeseable, con la excepción de las lagunas anaerobias.

Coloración de las distintas lagunas. Como veíamos en los capítulos anteriores, las lagunas anaerobias deben presentar un color gris, y las facultativas y de maduración un color verde brillante, menos intenso en las últimas.

Es importante consignar la aparición de manchas de distinto color en las lagunas, ya que estas variaciones pueden indicar el principio de desarrollo de microorganismos no deseados. También es muy importante registrar cualquier cambio del aspecto del agua, tal como el desarrollo de turbiedad o apariencia lechosa, coloraciones amarillentas, marrones, rosadas o rojas, y aparición de zonas diferenciadas dentro de las lagunas.

- Crecimiento de plantas en los taludes o dentro de las lagunas.
- Erosión de los taludes por la acción del agua.
- Infiltración visible del agua en los taludes: zonas húmedas en la base de los taludes, normalmente acompañado por crecimientos de cañas.
- Estado de los caminos de acceso a la planta depuradora y de los pasillos interiores entre las lagunas: presencia de barro, deterioro de la cubierta de grava o asfalto.
- Estado de la verja que rodea la instalación.
- Si la planta dispone de jardinería, condición en que se encuentra ésta; necesidad de reponer ejemplares de plantas, avance de las labores de poda, fumigación, etcétera.

Estado de los medidores de caudal y arquetas de reparto: acumulación de suciedad o fangos, desequilibrios visibles en los repartos de caudal, presencia de válvulas atascadas.

Si la planta dispone de una caseta donde almacenar las herramientas utilizadas por el operario, consignar el estado de la misma, necesidad de reparaciones, necesidad de reponer utensilios o mejorar de alguna forma la instalación.

Pretratamiento: Condición en que se encuentran las rejillas de desbaste, posibles dificultades en la remoción de gruesos, estado de desarenadores, desengrasadores, filtros y sedimentadores, de haberlos.

- Presencia de insectos o larvas en las lagunas.

Presencia de aves acuáticas.

- Presencia de roedores
- Desarrollo de olores en distintas partes de la instalación.

DETERMINACIONES ANALITICAS EN LAGUNAS

En la tabla 10.3 se recogen las variables que deben analizarse en plantas de tratamiento por lagunaje, los puntos de la instalación donde deben tomarse muestras y los tipos de muestreos a efectuar para cada variable

Para todas aquellas determinaciones que deban hacerse en el laboratorio, la función del operador es conseguir muestras representativas y tomar las precauciones necesarias para que lleguen al laboratorio en las mismas condiciones en que se tomaron.

Las aguas residuales son muy inestables, ya que contienen nutrientes y microorganismos en grandes cantidades, por lo que hay que tomar precauciones para evitar que su composición varíe entre el punto de toma de muestras y el laboratorio

En primer lugar, los análisis deben hacerse siempre que sea posible en un laboratorio que esté como máximo a dos horas de las lagunas de estabilización. En caso contrario habría que tomar precauciones especiales para la preservación de las muestras, con adición de distintos reactivos químicos para las distintas determinaciones. Si no se puede encontrar un laboratorio a menos de esta distancia, hay que asegurarse que se toman estas precauciones.

El laboratorio seleccionado deberá señalar en este caso los reactivos y cantidades de éstos a añadir a cada muestra, así como suministrar los aditivos correspondientes. Normalmente es posible disponer de un laboratorio que esté suficientemente próximo a la planta. En este caso el operador debe disponer de neveras portátiles y suficientes frascos de muestreo, que deberán estar esterilizados para las determinaciones microbiológicas. Estos últimos pueden conseguirse en las farmacias. Las muestras deben ponerse en la nevera llena de hielo inmediatamente, y llevarse al laboratorio

En cuanto a las determinaciones «in situ», el operador debe disponer como mínimo de un medidor portátil de oxígeno disuelto y temperatura. Es muy recomendable disponer también de un medidor de pH. Estos aparatos son muy fáciles de usar y de mantener. Las casas suministradoras proporcionan siempre instrucciones para su correcto uso y mantenimiento, así como los productos necesarios para que estén siempre limpios y preparados para su uso.

Como puede verse en la tabla 10.3, se recomiendan algunas técnicas especiales para la medida de algunas de las variables

- **Temperatura media del estanque:** la media de las temperaturas mínimas y máximas diarias a media distancia entre superficie y fondo constituye una buena aproximación a la temperatura media de la laguna (error absoluto $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$) (Pearson y col., 1987).

TABLA 10.3
Variables a determinar para el seguimiento mínimo de las lagunas de estabilización

Variable	Punto de muestreo ¹ y tipo de muestra ²					Observaciones
	AR	A	F	M	EF	
Flujo afluente	X				X	
DBO ₅	C	P	P	P	P	
DQO	C	P	P	P	P	Muestras filtradas y no filtradas
Sólidos Suspen-	C	P	P	P	P	
dos Totales						
Ceb. Fecales	C	P	P	P	P	
Clorofila «a»		P	P	P	P	
Amoníaco	C	P	P	P	P	
Nitratos	C	P	P	P	P	
Fosforo Total	C	P	P	P	P	
Sulfuros	C	P	P	P	P	En caso de olor o mal funcionamiento
Sulfatos	C	P	P	P	P	En caso de olor o mal funcionamiento
pH	C	P	PP	PP	C	
Temperatura	C	C	X	X	C	Temperatura media en F y M
Oxígeno dis.	C	P	PP	PP	C	
Conductividad	C				C	
Na, Ca y Mg					C	Cuando el efluente se use en riego
Pres. tango		X	X			Test de la toalla
Dat. Meteorolog						

¹AR: Agua residual bruta; A: Anaerobia; F: Facultativa; M: Maduración.

²1: Efluente Final

³C: Compuesta; P: Puntual; PP: Promedio Profundidad

Para efectuar esta medida se suspende un termómetro de máximas, mínimas en un punto situado a la profundidad media. El termómetro queda fijado mediante un peso que actúa como ancla, unido a una boya desde la que se suspende el termómetro unido a otro peso para evitar que derive y se acerque a la superficie. El termómetro debe quedar instalado durante un período de 24 horas de cada día en que se vayan a efectuar muestreos de la instalación. La temperatura media se calcula como la media aritmética de las máximas y mínimas para cada período (ver el apartado 6.1 de este capítulo).

- **Perfiles de temperatura:** Además de la temperatura media de las lagunas, puede ser importante disponer de medidas a varias profundidades, en especial en lagunas de profundidad superior a la normal ($>1,5$ metros). Esta medida es especialmente recomendable durante el verano, cuando es más probable la aparición de estratificación térmica.

La medida de temperaturas se puede realizar con un medidor portátil, cuya sonda se sumerge a distintas profundidades. Es suficiente disponer de medidas a cuatro profundidades, es decir, fondo y superficie, y otras dos distribuidas regularmente en la columna de agua.

Algunos medidores portátiles vienen equipados con un soporte rígido al que se fija la sonda, lo que permite introducirla fácilmente hasta la profundidad deseada. Si no se dispone de este soporte se puede fijar la sonda a cualquier otro soporte rígido de fabricación casera. Los perfiles deben medirse por lo menos a tres horas distintas del día (9 h., 13 h. y 17 h., por ejemplo). Puesto que la aparición de estratificación térmica tiene lugar en el verano, no es necesario llevar a cabo estas medidas durante la temporada de muestreos de invierno.

- **Oxígeno disuelto:** La concentración de oxígeno disuelto se determina a menudo en los efluentes de las lagunas, lo que suministra una información puntual que debe acompañarse de la hora del día en que se verificó la medida, ya que el oxígeno disuelto varía mucho en función de la intensidad de la radiación solar. Con objeto de conocer estas variaciones durante las épocas de actividad máxima y mínima es conveniente realizar la medida de oxígeno disuelto a distintas horas del día y profundidades al menos en dos ocasiones, durante las dos temporadas de muestreo.

Esta medida se puede realizar con un medidor portátil de oxígeno disuelto, cuya sonda se sumerge a distintas profundidades. Como en la medida de perfiles verticales de temperatura, es suficiente disponer de medidas a cuatro profundidades, es decir, fondo y superficie, y otras dos distribuidas regularmente en la columna de agua. Los perfiles deben medirse por lo menos a tres horas distintas del día (9 h., 13 h. y 17 h., por ejemplo).

Otra precaución a tomar cuando se mide la concentración de oxígeno disuelto es evitar en lo posible todas las turbulencias en el punto de muestreo. Por ejemplo, en algunas lagunas la salida se produce aprovechando un desnivel. Si el agua se agita fuertemente en su caída por el conducto de salida, tiene lugar una aireación que producirá resultados demasiado altos de oxígeno disuelto. Por tanto, hay que medir la concentración de oxígeno antes de la turbulencia.

- **Sulfatos y sulfuros:** La medida de estas dos variables puede resultar muy útil cuando se presentan problemas de mal funcionamiento y olores. Normalmente la aparición de olores está asociada a sobrecargas, tanto en lagunas anaerobias como facultativas. La presencia de sulfuros en el agua residual bruta indica que ésta se encuentra en condiciones sépticas.

Puesto que las concentraciones elevadas de sulfuros resultan también tóxicas para las algas, es conveniente disponer de estas medidas siempre que haya problemas de olores, la DBO₅ de la salida de las lagunas facultativas sea anormalmente alta (superior a 100 mg/l) o la concentración de clorofila «a» sea anormalmente baja (inferior a 100 µg/l en invierno o 250 µg/l en verano) (Pearson y col., 1987).

- Sodio, magnesio y calcio: Cuando el efluente vaya a utilizarse en riegos es necesaria la medida de estos tres cationes para evaluar la calidad del agua en este uso.

Las concentraciones elevadas de sodio dan lugar a la dispersión de las partículas de los suelos arcillosos y disminuyen su permeabilidad. Uno de los índices más utilizados para determinar la calidad de un agua para riego es la relación de absorción de sodio (SAR), que se define en la forma siguiente:

$$SAR = \frac{Na}{[(Ca + Mg)/2]^{1/2}} \quad (10.1)$$

donde Na, Ca y Mg son la concentración de sodio, calcio y magnesio, respectivamente, en meq/l.

- Profundidad del fango: La acumulación de fangos en las lagunas anaerobias y facultativas primarias (las que reciben el agua residual directamente) debe medirse al menos una vez durante cada período de muestreo.

El test de la «toalla» consiste en revestir el extremo de un palo de suficiente longitud con tela blanca absorbente, como puede ser una toalla blanca. Una vez que la tela se encuentra bien fijada al soporte, se introduce éste en la laguna cuidando que permanezca en posición vertical, hasta que alcance el fondo. Entonces se retira y se mide la altura manchada con fango, que queda fácilmente retenido en la toalla. Esta operación debe repetirse en varios puntos de cada laguna (dependiendo de las dimensiones, de tres o seis puntos), y calcularse seguidamente la profundidad media del fango depositado (Malan, 1964).

- Datos meteorológicos: Muchas lagunas de estabilización cuentan con una pequeña estación meteorológica en la que se puede medir la temperatura máxima y mínima diaria, evaporación, precipitación, velocidad y dirección del viento. Si no se cuenta con esta instalación mínima, se pueden conseguir estos datos de algún observatorio que esté situado como máximo a 10 kilómetros de la planta de tratamiento. Cuando la distancia supere este máximo, hay que intentar por todos los medios que se instale en la misma planta el equipo necesario para las medidas mínimas indicadas. Este equipo es muy barato y no ofrece ninguna dificultad de instalación o manejo. Siempre que sea posible, es muy conveniente disponer también de medidas de intensidad de radiación solar, horas de luz diarias y humedad relativa (W. H. O., 1987).

Si el Observatorio Meteorológico más cercano está a más de 10 kilómetros y aún no se cuenta con el equipo necesario para las medidas mínimas en la planta,

la Organización Mundial de la Salud (W. H. O., 1987) recomienda registrar las observaciones siguientes:

Precipitación:

- Nula (tiempo seco).
- Lluvia fina (chispeando).
- Lluvia moderada.
- Lluvia fuerte.

En los tres últimos casos hay que consignar también la duración de la lluvia.

Viento:

- Aire en calma.
- Brisa.
- Viento moderado.
- Viento fuerte.

Radiación solar:

- Luz brillante (despejado, sin nubes).
- Nubes ocasionales.
- Parcialmente nublado.
- Nublado.

Estas observaciones pueden servir de gran ayuda para interpretar los resultados de los controles operativo y analítico, en ausencia de datos cuantitativos.

- ▶ **Otras determinaciones:** Si la laguna recibe algún vertido industrial, además de los análisis recogidos en la tabla 10.3 hay que incluir otros que permitan establecer la eficacia en la eliminación de estas nuevas variables durante el tratamiento, y la posible toxicidad de los vertidos.

Los resultados de los controles se deben presentar en forma de tabla para que se puedan interpretar más fácilmente. En las tablas 10.4 y 10.5 se ha incluido un modelo orientativo, en el que se recogerían las observaciones diarias resultantes del control operativo y la medida de las variables meteorológicas. Este parte se complementa con los datos del control analítico, recogidos en la tabla 10.6.

Una versión de estas tablas que pueden utilizarse directamente para la presentación de resultados se encuentra al final de este capítulo. En estas tablas se ha supuesto que la planta tiene únicamente una laguna de cada tipo, por lo que habría que adaptarla al número adecuado de lagunas en cada caso concreto.

TABLA 10.4
Parte diario del control operativo

Fecha:	Hora:	Nombre del Operador:
Incidencias:		
<ul style="list-style-type: none"> - Caudal, m³/día <ul style="list-style-type: none"> ● Agua residual ● Efluente - Profundidad del agua, m - Profundidad del fango, cm. Espumas o flotantes: <ul style="list-style-type: none"> ● Situación en las lagunas - Manchas de grasa <ul style="list-style-type: none"> ● Situación en las lagunas - Fangos flotantes. <ul style="list-style-type: none"> ● Situación en las lagunas. - Coloración <ul style="list-style-type: none"> ● Lagunas anaerobias. ● Lagunas facultativas ● Lagunas de maduración - Aparición de manchas de colores. <ul style="list-style-type: none"> ● Situación en las lagunas - Crecimiento de plantas. <ul style="list-style-type: none"> ● En los taludes. ● Dentro de las lagunas. - Erosión de los taludes. <ul style="list-style-type: none"> ● Puntos donde se aprecia erosión. - Infiltraciones de agua <ul style="list-style-type: none"> ● Zonas con infiltraciones. - Estado de la verja - Estado de los caminos. - Estado del acceso a la planta Pretratamiento. <ul style="list-style-type: none"> ● Estado de las rejas ● Acumulación de gruesos ● Estado de los desengrasadores ● Estado de los filtros ● Estado de sedimentadores - Medidores de caudal. - Jardinería. - Cusca. - Presencia de insectos o larvas. - Presencia de rotíferos y pulgas de agua. - Presencia de roedores - Presencia de aves acuáticas. - Aparición de olores <ul style="list-style-type: none"> ● Lagunas anaerobias. ● Lagunas facultativas ● Lagunas de maduración 		
Observaciones:		

TABLA 10.5
Medidas meteorológicas

Medidas meteorológicas:		
Variable	Hora	Observaciones
Temperatura aire.		
Evaporación.		
Precipitación		
Velocidad del viento		
Dirección del viento		
Radiación solar.		

ANÁLISIS
Resultados analíticos

Variable	Muestra	Observaciones
Temperatura del agua, C°		
DBO ₅ , mg/l.		
DQO, mg/l.		
Sólidos en suspensión, mg/l.		
Coliformes fecales por 100 ml.		
Clorofila «a», µg/l.		
Amoniaco, mg/l.		
Nitratos, mg/l.		
Fosforo total, mg/l.		
Sulfuros, mg/l.		
Sulfatos, mg/l.		
pH.		
Oxígeno disuelto, mg/l.		
Conductividad, µ Siemens/cm		
Sodio, mg/l.		
Calcio, mg/l.		
Magnesio, mg/l.		

ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A medida que pasa el tiempo desde que la planta de depuración se puso en marcha se va produciendo una acumulación de resultados experimentales, tanto de las determinaciones «in situ» que se han ido recogiendo como de las determinaciones de laboratorio que éste ha ido remitiendo a la depuradora. Aunque al principio hay pocos resultados y es fácil recordarlos, poco a poco las nuevas fichas con resultados se van amontonando hasta que se convierten en un archivo polvoriento del que nadie saca provecho.

Para evitar que de esta forma el trabajo del operador se convierta en una monotonía recopiladora de números que no interesan a él ni a nadie, es muy importante que el propio operador sepa analizar los resultados que se van obteniendo y presentarlos de forma que resulten fácil de interpretar e interesantes. Para ello, en esta sección vamos a estudiar algunos conceptos necesarios para el análisis de resultados (media, mediana, varianza, cálculo del rendimiento), así como la confección e interpretación de gráficos.

Media aritmética

La media aritmética de un conjunto de N valores es la suma de estos dividida por su número N, es decir:

$$a_m = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{N}$$

Por ejemplo, si queremos calcular el valor medio del caudal durante una semana y tenemos los caudales que han entrado durante cada uno de los días en la planta depuradora, tal como aparecen en la tabla 10.7, tendremos que proceder en la forma siguiente:

$$\begin{aligned} Q_m &= (Q_1 + Q_{1a} + Q_{1m} + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6)/7 \\ &= (1.200 + 1.220 + 1.210 + 1.240 + 1.200 + 1.370 + 1.100)/7 \\ &= 1.191 \text{ m}^3/\text{día.} \end{aligned}$$

TABLA 10.7
Valores del caudal diario de entrada en la planta depuradora

Día de la semana	Caudal, m ³ /día
Lunes	1.200
Martes	1.220
Miércoles	1.210
Jueves	1.240
Viernes	1.200
Sábado	1.170
Domingo	1.100

Este mismo procedimiento se aplicaría para calcular el valor medio de cualquier otra variable. Por ejemplo, resulta interesante conocer cuál es la media de la materia orgánica a la salida de la planta durante un año, bien como DCO o como DBO₅. Para calcular estas medias habría que sumar todos los resultados procedentes del laboratorio y dividir por el número total de éstos. Otro cálculo interesante es la media en invierno y en verano de la materia orgánica a la salida de la planta. En la tabla 10.8 se recogen los resultados correspondientes a la DBO₅ en el muestreo intensivo de invierno y verano en una planta de depuración por lagunaje. Estos muestreos consistieron en una toma diaria de muestras durante cuatro semanas y se llevaron a cabo en los meses de enero y julio.

TABLA 10.8
Resultados de la DBO₅ a la salida de la planta, muestreos intensivos de invierno y verano

Día	DBO ₅ , mg O ₂ /l	
	Invierno	Verano
1	90	30
2	95	25
3	100	25
4	80	30
5	75	20
6	82	15
7	70	20
8	50	25
9	55	30
10	50	20
11	60	15
12	55	10
13	50	12
14	55	20
15	55	20
16	45	15
17	45	10
18	50	20
19	40	25
20	50	20
21	45	22
22	50	25
23	40	20
24	50	25
25	55	15
26	50	20
27	45	22
28	40	15

Para calcular la DBO₅ media en invierno, sumamos todos los resultados de la segunda columna en la tabla 10.8 y dividimos por el número total de valores, es decir, 28.

Para calcular la DBO₅ media en verano hacemos lo mismo con los resultados de la tercera columna:

$$DBO_{5\text{ inv}} = (\text{suma valores en columna 2})/28 = 58,1 \text{ mg/l.}$$

$$DBO_{5\text{ ver}} = (\text{suma valores en columna 3})/28 = 20,4 \text{ mg/l.}$$

De esta forma obtenemos los dos valores medios, en los que se comprueba fácilmente que la depuradora funciona mejor durante el verano, sin tener que manejar a la vez todos los resultados de la tabla.

Intervalo de variación

En el apartado anterior hemos visto cómo se calcula la media de una serie de valores. Sin embargo, este valor por sí mismo no informa sobre la dispersión de aquéllos, es decir, las variaciones que existen entre las diferentes medidas utilizadas para calcular la media. Una de las posibles formas de evaluar la dispersión es el intervalo de variación. Este consiste en la diferencia entre el valor más alto y el más bajo de la serie de números que se están considerando. Por ejemplo, en las medidas de la DBO₅ contenidas en la tabla 10.8, los intervalos de valores para invierno y verano serán, respectivamente:

$$\begin{aligned} \text{Invierno: Valor máximo} &= 100 \text{ mg/l.} \\ \text{Valor mínimo} &= 40 \text{ mg/l.} \\ \text{Intervalo de valores} &= 100 - 40 = 60 \text{ mg/l.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Verano: Valor máximo} &= 30 \text{ mg/l.} \\ \text{Valor mínimo} &= 10 \text{ mg/l.} \\ \text{Intervalo de valores} &= 30 - 10 = 20 \text{ mg/l.} \end{aligned}$$

Por consiguiente, los datos recogidos en verano presentan una dispersión menor.

Varianza y desviación típica

Otra medida de la dispersión de un grupo de valores la proporciona el cálculo de su varianza y desviación típica. Cuando se conoce la media e intervalo de variación se tiene una cierta idea sobre las características de ese conjunto de valores, pero no hay forma de averiguar si estos valores se concentran en la parte central del intervalo o en los extremos de éste, es decir, no se conoce su distribución en dicho intervalo.

Consideremos como ejemplo el caso siguiente: se ha medido la DQO a la salida de dos lagunas facultativas durante dos semanas, con los resultados que se recogen en la tabla 10.9. Con objeto de presentar unos valores que representen todas las medidas llevadas a cabo sin tener que manejar todos los datos, lo que es muy engorroso, se han calculado los valores medios y la dispersión de los dos conjuntos de medidas. Los resultados son los siguientes:

Conjunto de medidas A:

Media = 50 mg/l

Intervalo de variación = 50 mg/l.

Conjunto de medidas B:

Media = 50 mg/l

Intervalo de variación = 50 mg/l.

Es decir, estas dos medidas no son suficientes para informar sobre la diferente distribución de los valores en uno y otro conjunto de muestras. Como puede observarse en la tabla 10.9, los valores correspondientes a la laguna A son mucho más uniformes, y sólo dos de ellos están situados en los extremos del intervalo de valores. Sin embargo, la laguna B presenta una dispersión mucho mayor, con altibajos continuos en los valores de la DQO a la salida.

TABLA 10.9
Medidas diarias de DQO a la salida de dos lagunas facultativas

Laguna A	50	75	45	50	55	60	50
	40	45	25	55	55	50	45
Laguna B	70	75	25	30	75	70	30
	30	65	25	35	75	70	25

Las medidas que pueden proporcionar esta información sobre la distribución de los valores son la varianza y la desviación típica. La varianza se calcula hallando las diferencias que existen entre cada valor y la media, sumando estas diferencias y elevándolas al cuadrado para evitar que se compensen aquellas que tengan distinto signo, y por último dividiendo la suma obtenida por el número de valores menos uno, tal como indica la ecuación siguiente:

$$S^2 = \frac{\sum (X - X_m)^2}{N-1}$$

donde S^2 = varianza,

X = cada uno de los valores del conjunto;

X_m = media aritmética del conjunto de valores, y

N = número total de valores

Aplicando esta definición al ejemplo anterior, la varianza de los resultados correspondientes a la laguna A y B sería la siguiente:

$$S_A^2 = 123 \text{ (mg/l)}^2.$$

$$S_B^2 = 507 \text{ (mg/l)}^2.$$

Es decir, la dispersión es mayor en los resultados correspondientes a la salida de la laguna B.

Muchas veces la dispersión se expresa por medio de la desviación típica, S , que es la raíz cuadrada de la varianza. Para el ejemplo anterior, la desviación típica sería:

$$S_A = 11,1 \text{ mg/l};$$

$$S_B = 22,5 \text{ mg/l},$$

Mediana y moda

En algunos casos la media aritmética da una idea poco realista del conjunto de valores a los que representa. Por ejemplo, pensemos en una laguna de estabilización que está proyectada para recibir exclusivamente las aguas residuales urbanas de un pueblo. Durante la primera quincena del mes de julio se han hecho unas pruebas en el matadero local, y accidentalmente se ha vertido agua fuertemente contaminada a la red municipal. Los valores de la DQO durante esas dos semanas a la entrada de la planta se recogen en la tabla 10.10. Como puede verse, uno de éstos resultados es extremadamente alto, y corresponde al vertido accidental de efluentes y matadero.

TABLA 10.10
Demanda química de oxígeno a la entrada a la planta de tratamiento

211	250	308	250	190	232	250
3.678	250	290	352	190	190	250

Si calculamos la media aritmética de estas medidas, obtenemos un valor de 492 mg/l, que como puede verse es unas dos veces superior a todos los valores de la tabla, con la excepción del correspondiente al día del accidente. Para evitar la utilización de un valor medio poco realista, en estos casos es conveniente el uso de la mediana. La mediana se define como el valor central de un conjunto ordenado en forma creciente o decreciente. En el ejemplo anterior, si colocamos los números en orden creciente tendremos:

TABLA 10.11
Demanda química de oxígeno a la entrada a la planta de tratamiento. Valores ordenados en forma creciente

109	190	190	211	232	250	250
250	250	250	290	308	352	3.678

Puesto que el número total de datos es par, hay dos valores que ocupan la posición central, es decir los valores 7 y 8 en la tabla anterior. La mediana se calcula como la media aritmética de estos dos valores. En este caso los dos valores son iguales, de 250 mg/l, por lo que su media es también 250 mg/l.

Otra medida que puede resultar útil es la moda. La moda se define como el valor que más se repite en un conjunto de valores. En el ejemplo anterior la moda es 250 mg/l, que se repite cinco veces. Puede haber más de una moda en una serie de datos, si más de uno de ellos se repite el mismo número máximo de veces.

Cálculo del rendimiento

La evaluación del buen funcionamiento de una planta depuradora por lagunaje se lleva a cabo mediante dos procedimientos:

- a) Indicar el valor del contenido de la materia orgánica u otras variables (oxígeno disuelto, materia en suspensión, nutrientes, coliformes) a la salida de la planta.
- b) Calcular el porcentaje en la reducción de alguna de las variables de interés.

Cuando se utiliza el segundo procedimiento se está utilizando el concepto de rendimiento de la depuración. Normalmente el rendimiento se calcula sobre la materia orgánica expresada como DBO₅, aunque se puede hablar también del rendimiento en la reducción de nutrientes u otra variable.

La reducción porcentual o rendimiento de la depuración se calcula en la forma siguiente:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{DBO}_{\text{ent}} - \text{DBO}_{\text{sal}}}{\text{DBO}_{\text{ent}}} \times 100$$

donde DBO_{ent} es la demanda bioquímica de oxígeno de entrada a la planta y DBO_{sal} es la demanda bioquímica de oxígeno a la salida. El mismo concepto puede aplicarse a cada una de las lagunas por separado para calcular el rendimiento de la depuración en las mismas.

Gráficos

Una de las formas de presentar los datos más fácil de interpretar y que más ayuda a entender lo que ocurre en una depuradora por lagunaje es la confección de gráficos. La presentación de resultados en gráficos permite ordenar fácilmente los resultados, que de otra forma se van amontonando en tablas de las que es difícil extraer conclusiones. En este apartado veremos dos tipos fundamentales de gráficos, que son los gráficos de barras y los lineales.

Gráficos de barras

En este tipo de gráficos se representa la frecuencia con que se repiten los resultados o intervalos de resultados. Esta modalidad de gráficos permite estudiar fácilmente las características de los datos que se van recogiendo, y en especial su dispersión y distribución.

Como ejemplo vamos a confeccionar gráficos de barras a partir de los datos recogidos en la tabla 10.9. Como vimos antes, estos resultados corresponden a los análisis de la DBO₅ a la salida de las lagunas facultativas A y B que presentan la misma media e intervalo de variación, pero sus varianzas son muy distintas. Vamos a ver

ahora en qué forma un gráfico de barras ayuda a visualizar inmediatamente las diferencias entre los dos conjuntos de resultados.

El primer paso para la realización del gráfico es determinar la frecuencia de cada resultado. Teniendo en cuenta que el intervalo de variación es de 50 mg/l, vamos a agrupar los resultados en subintervalos iguales de 5 mg/l y determinar la frecuencia o número de veces que se repiten los valores de la DQO en cada uno de estos subintervalos. La amplitud de los subintervalos se determina de forma que se obtengan unos 5-10. Para determinar la frecuencia tenemos que contar cuántas veces se repiten los valores en cada subintervalo, tal como se recoge en la tabla 10.12.

TABLA 10.12
Frecuencia de los resultados obtenidos en las lagunas A y B

Laguna A	50	75	45	50	55	60	50
	40	45	25	55	55	50	45
Laguna B	70	75	25	30	75	70	30
	30	65	25	35	75	70	25
Intervalo	Punto medio	Frecuencia					
		A	B				
22,5 - 27,5	25	1	3				
27,5 - 32,5	30	0	3				
32,5 - 37,5	35	0	1				
37,5 - 42,5	40	1	0				
42,5 - 47,5	45	3	0				
47,5 - 52,5	50	4	0				
52,5 - 57,5	55	3	0				
57,5 - 62,5	60	1	0				
62,5 - 67,5	65	0	1				
67,5 - 72,5	70	0	3				
72,5 - 77,5	75	1	3				

Una vez calculada la frecuencia con que se repiten los valores en cada intervalo, se llevan a una gráfica en la forma recogida en las figuras 10.1 y 10.2. Un simple vistazo a estas gráficas nos informa de que los dos conjuntos de valores son muy diferentes, y que los resultados correspondientes a la laguna B presentan una dispersión mucho mayor. Otra observación que se desprende fácilmente de estas dos gráficas es que ambas son simétricas. En distribuciones simétricas la media y la mediana presentan aproximadamente el mismo valor, mientras que en distribuciones asimétricas como la que se recoge en la figura 10.3 la media y la mediana presentan valores distintos.

Gráfico de líneas

En este tipo de gráficos se representa el valor de una variable frente a otra, que suele ser el tiempo. De esta forma se visualizan fácilmente las tendencias en la planta depuradora.

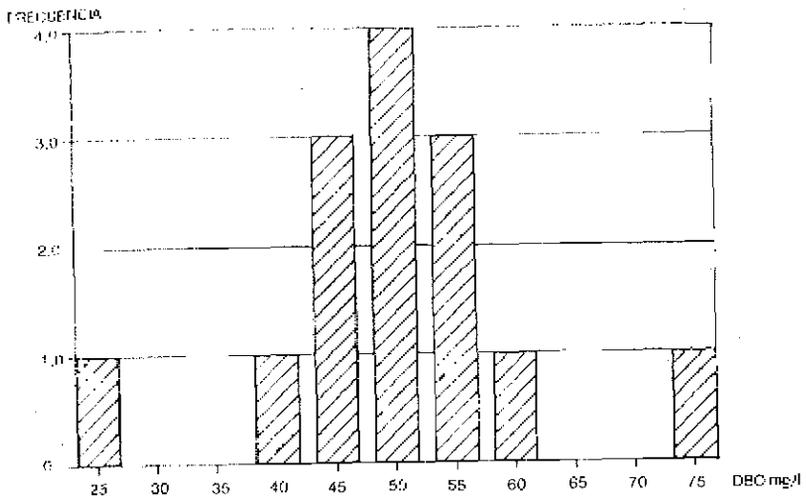


FIGURA 10.1
Distribución de frecuencias. Laguna A

DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS. LAGUNA B

Fig 10.

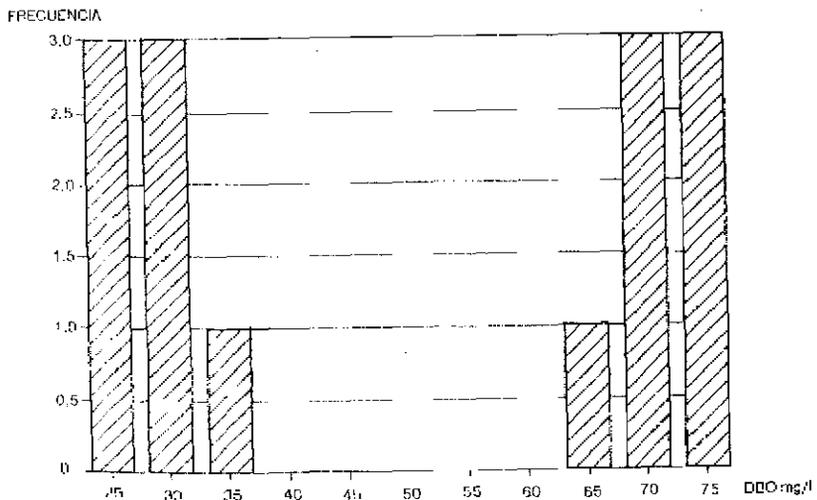


FIGURA 10.2
Distribución de frecuencias. Laguna B

FRECUENCIA

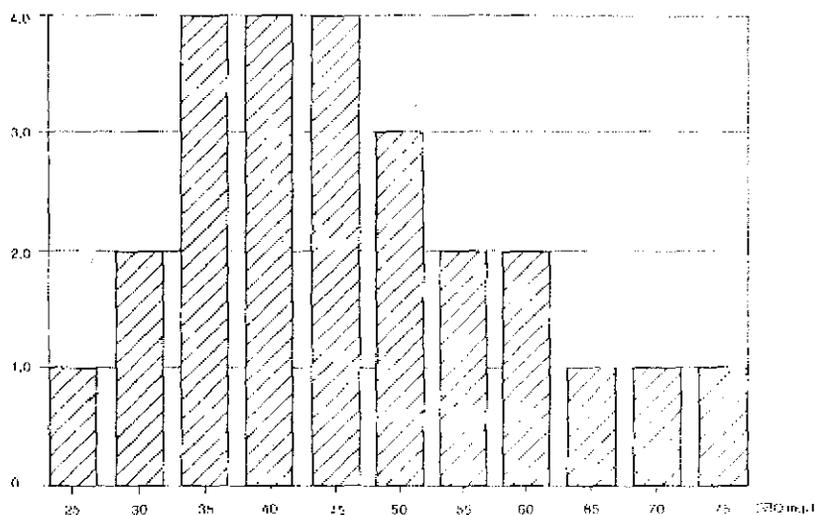


FIGURA 10.3
Distribución asimétrica de frecuencias

Por ejemplo, si representamos la Demanda Química de Oxígeno a la salida de la planta en función de la época del año obtendremos una gráfica en la que se aprecia un descenso en el contenido de materia orgánica durante la parte central del año, cuando la temperatura es más alta (fig. 10.4). Puesto que las variaciones en el comportamiento de las lagunas dependen de las condiciones meteorológicas y de la composición y caudal del agua residual de entrada, si en años sucesivos no se esperan cambios en la alimentación puede suponerse que el comportamiento de la planta será similar al que se refleja en la figura 10.4.

La mayor parte de los resultados que se obtienen en el seguimiento de las lagunas de estabilización se pueden representar fácilmente frente al tiempo, obteniéndose así gráficas que resultan muy interesantes y de las que se pueden extraer multitud de consecuencias prácticas. Sobre todo, la realización de gráficos permite disponer de los resultados en una forma muy sencilla de interpretar, en lugar de los montones de fichas llenas de números.

En las figuras 10.5 y 10.6 se recogen otros dos ejemplos de gráficos de líneas basados en los datos recogidos en lagunas de estabilización, y que resumen la información acumulada durante su seguimiento.

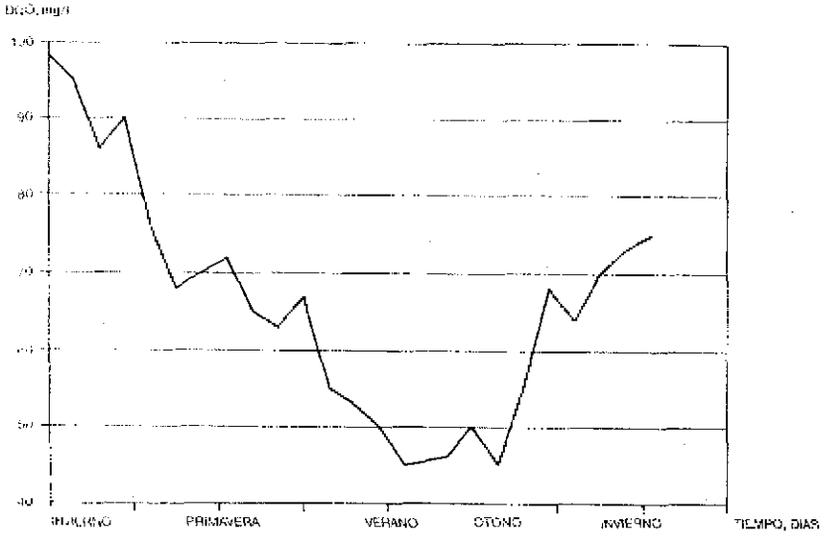


FIGURA 10.4
DQO, a la salida, mg/ml

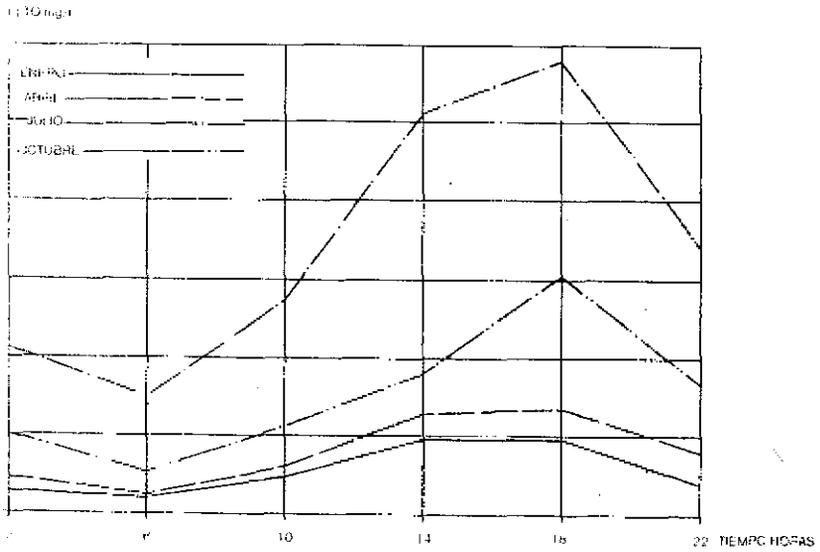


FIGURA 10.5
Evolución del oxígeno disuelto

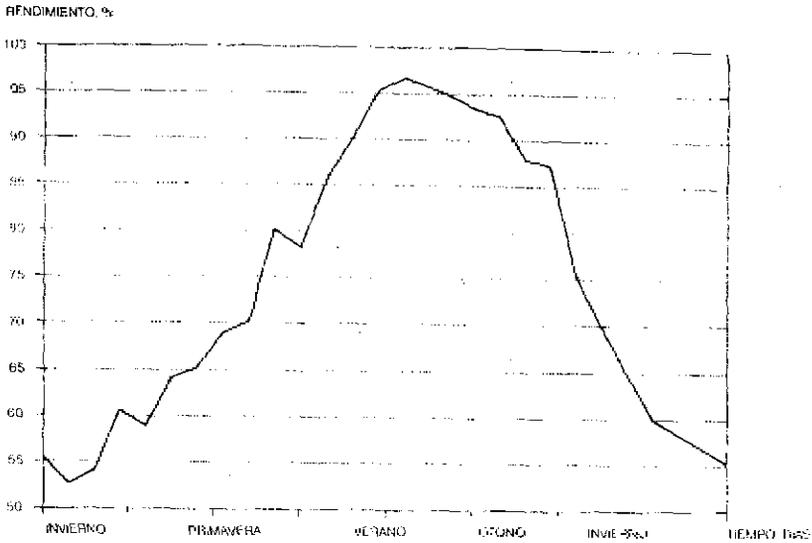


FIGURA 10.6
Rendimiento de eliminación de DQO, %

La figura 10.5 es una representación del contenido de oxígeno disuelto en la superficie de una laguna facultativa a lo largo de varios días en los que se midió el oxígeno a intervalos de cuatro horas durante veinticuatro horas. Los datos recogidos en esta figura aparecen en la tabla 10.13.

TABLA 10.13
Variación de la concentración de oxígeno disuelto en superficie, en una laguna facultativa en distintos días del año

Hora	6	10	11	18	22	2
10 de enero.	0,5	1,2	2,4	2,4	1,0	0,7
10 de abril.	0,6	1,5	3,2	3,4	2,0	1,1
10 de julio.	2,3	5,2	9,4	14,5	8,6	5,3
10 de octubre.	1,3	2,8	4,5	7,6	4,2	2,5

La figura 10.6 es un gráfico de líneas que representa el rendimiento en la eliminación de DQO a lo largo de un año, en el que se realizaron muestreos quincenales a la entrada y salida de la planta depuradora. Los datos recogidos en esta gráfica aparecen en la tabla 10.14.

TABLA 10.14
Rendimiento en la eliminación de la DQO en una planta depuradora por lagunaje,
datos quincenales tomados a partir del 1 de enero (porcentajes)

55,3	52,6	54,1	60,6	58,9	64,2
65,1	68,9	70,2	80,2	78,3	85,8
90,3	95,5	96,8	95,0	93,6	92,7
88,0	87,3	75,4	70,1	65,2	60,2

Otra variable cuyo valor cambia mucho a lo largo del día es, como vemos en el capítulo 2, el caudal de entrada a la planta. En la tabla 10.15 aparecen los valores del caudal de alimentación medidos a intervalos de 2 horas durante un día completo. Si representamos gráficamente estos valores obtendremos la curva que se muestra en la figura 10.7. Esta gráfica resulta muy útil para calcular los volúmenes a utilizar en la obtención de muestras compuestas, y para planificar los labores de mantenimiento de acuerdo con el caudal que recibe la planta a distintas horas.

EVOLUCION DEL CAUDAL A LO LARGO DEL DIA

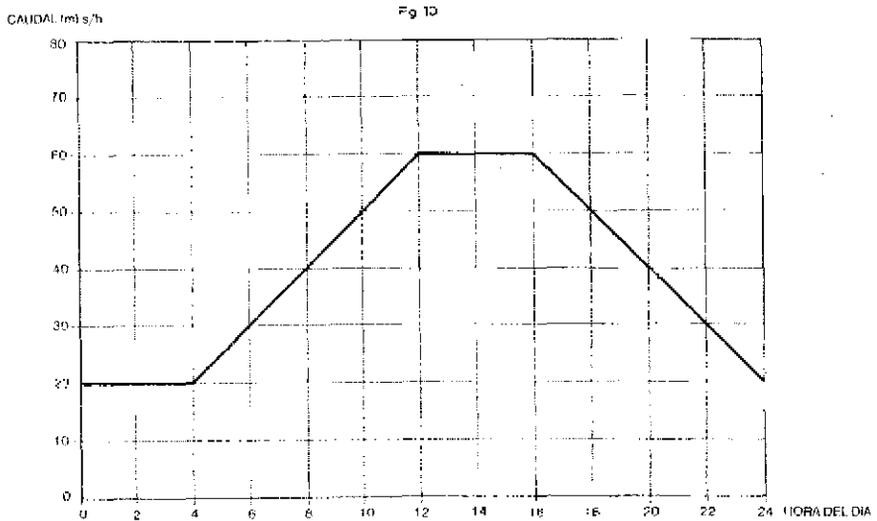


FIGURA 10.7
Evolución del caudal a lo largo del día

TABLA 10.15
Parte Diario del Control Operativo

Fecha:	Hora:					Nombre del Operador:
	AR	A	F	M	EF	Observaciones
Caudal.						
Profundidad del agua, m.						
Profundidad fango, cm.						
Espumas o flotantes.						
Munchas de grasa.						
Fangos flotantes.						
Coloración.						
Manchas de colores.						
Plantas de taludes.						
Plantas acuáticas.						
Erosión de taludes.						
Infiltraciones de agua.						
Insectos o larvas.						
Rotíferos, pulgas de agua.						
Roedores.						
Aves acuáticas.						
Olores desagradables.						
Estado de la verja.						
Estado de los caminos.						
Estado del acceso.						
PRET: rejas.						
PRET: acum. de gruesos.						
PRET: cámaras de grasa.						
PRET: filtros.						
PRET: sedimentadores.						
PRET: medidores caudal.						
Jardinería.						
Caseta.						

AR: Agua residual bruta; A: Anórobia; F: Facultativa; M: Maduración; EF: Efluente final