

4 METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS MEDIANTE INFILTRACIÓN DIRECTA EN EL TERRENO

Una vez localizada la zona idónea para la ubicación del sistema de infiltración es necesario proceder a su dimensionado y construcción, así como a la definición de los parámetros de funcionamiento (periodos de humectación/desecado) y al diseño del sistema de vigilancia y control.

4.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA SUPERFICIE DE INFILTRACIÓN

La distribución espacial de la superficie de infiltración depende tanto de la geometría del emplazamiento como del ciclo operativo elegido. La zona de infiltración debe ser dividida en varias zonas separadas, de forma que mientras unas reciben agua las otras se encuentran en fase de secado. El número y dimensiones de tales zonas debe calcularse de forma que siempre se disponga de suficiente superficie (si no existen sistemas de almacenamiento previo) para infiltrar el agua producida en la población servida y que el nivel de secado, en cualquier época del año, sea el previsto en todas las balsas. La superficie de las balsas es muy variable, aunque la mayoría se encuentra entre 2.000 y 90.000 m².

Otro factor limitante a la hora de determinar la geometría y dimensiones de las balsas de infiltración es la situación del nivel freático y su oscilación anual, las balsas de infiltración crean un domo de recarga bajo ellas, por tanto, para un correcto dimensionado del sistema es preciso tener en cuenta cuestiones tales como: (Metcalf y Eddy, 1998)

1. Geometría de las balsas.
2. Caudal medio de aplicación.
3. Distancia vertical mínima hasta el nivel freático.
4. Distancia vertical hasta alcanzar un estrato impermeable.
5. Pendiente del nivel freático.
6. Conductividad hidráulica horizontal del acuífero.
7. Espacio efectivo entre poros en el suelo situado por encima del nivel freático.
8. Altura y distancia respecto a condiciones de contorno horizontales (arroyos, ríos o superficies de lagos).
9. Necesidades de seguimiento.

4.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE DISTRIBUCIÓN DEL ARU

El método de reparto del agua más adecuado, sobre todo en el caso de balsas próximas a las poblaciones o con requerimientos de coste mínimo, es el reparto mediante tuberías de distribución, también se emplean aspersores, pero presentan mayor número de inconvenientes y limitaciones técnicas. En cualquier caso es necesario tener en

consideración además de los costes de instalación y mantenimiento del sistema otras consideraciones, entre las que se incluye la naturaleza del suelo, la topografía y el clima de la zona.

Sistemas de aspersión

Sólo se emplean en los casos en que la topografía del terreno imposibilita una correcta distribución del agua mediante tuberías de distribución. En este tipo de balsas, en las que existe una cierta pendiente, suele ser necesario disponer algún tipo de vegetación (vegetación hidrófila-nitrófila) con el fin de aumentar el tiempo de contacto del agua con el lecho filtrante favoreciendo la infiltración del agua residual y evitando la erosión.

Tuberías de reparto

Las tuberías de reparto deben ser colocadas de forma que se garantice una distribución homogénea del agua residual por toda la superficie de infiltración. Generalmente los terrenos más permeables necesitan una mayor cantidad de tuberías con el fin de evitar que la mayor parte del agua se infiltre en una pequeña parte de la superficie de la balsa.

Las tuberías funcionan, en el mejor de los casos, por gravedad, o si ello no es posible debido al relieve, mediante sistemas a baja presión. La disposición de las tuberías debe evitar que el agua impacte contra el suelo produciendo su erosión.



Foto 4.1 Es necesario evitar, en la medida de lo posible, la erosión producida por el impacto del agua en el lecho de la balsa de infiltración.

Al contrario que en los sistemas con aspersores, normalmente no es necesaria la presencia de vegetación, aunque esta puede contribuir a la interceptación de sólidos en suspensión y a facilitar la infiltración del ARU debido al crecimiento de las raíces. Un

inconveniente de la presencia de vegetación es que esta requiere un mantenimiento mayor que las superficies no vegetadas. La vegetación intercepta la radiación solar y dependiendo del clima y tipo de plantas, puede disminuir la velocidad de desecado de las balsas o hacerla menos previsible que en el caso de balsas desnudas. Las superficies vegetadas impiden, o al menos dificultan, el escarificado de la superficie de la basa en caso de colmatación.

4.3 CÁLCULO DEL ÁREA DE INFILTRACIÓN EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA A APLICAR

La determinación de la carga hidráulica anual es uno de los aspectos más críticos en el diseño de un sistema de IR. Del mismo modo, el ciclo operacional (ciclo de humectación-desecado) es otro factor importante que se determina independientemente del anterior. Combinando la carga hidráulica anual y el ciclo operacional se puede obtener el caudal de aplicación del agua residual.

Determinación de la carga hidráulica

El diseño de un sistema de IR queda caracterizado por dos valores de la carga hidráulica aplicada; la carga hidráulica media anual (mm/año) y la carga hidráulica real correspondiente al periodo de aplicación del agua residual (carga media de aplicación), expresada en mm/d. (Metcalf y Eddy, 1998.)

La forma de evaluar correctamente los valores de la carga hidráulica es mediante experimentación in situ, usando balsas experimentales con un tamaño mínimo de 2x2 m, empleando el mismo agua residual que se va a utilizar en el sistema real, y realizando diferentes combinaciones de periodos de humectación / desecado que cubran el rango esperable para el sistema real. (Bower en Asano, 1985)

La carga hidráulica anual del proyecto se suele determinar en función de la permeabilidad o conductividad vertical efectiva de la columna de suelo situada por encima del agua subterránea o del estrato rocoso subyacente. Sin embargo, en algunos casos, la carga de constituyentes como el nitrógeno, en aguas residuales urbanas, y la DBO_5 en aguas residuales industriales, pueden ser el factor determinante del valor de la carga hidráulica de proyecto. La carga hidráulica media anual, basada en la permeabilidad del terreno, se obtiene multiplicando la velocidad de infiltración a largo plazo determinada in situ por un factor de aplicación que depende del sistema empleado para las mediciones de campo, de las características del agua residual a aplicar y del número de días al año en que funciona el sistema. (Metcalf y Eddy, 1998).

$$L_w = (IR) \cdot (OD) \cdot (F) \cdot (24 \text{ h/d})$$

IR = velocidad de infiltración, mm/h.

OD = número de días en funcionamiento al año, d/año.

F = factor de aplicación.

L_w = carga hidráulica anual.

En la tabla 4.1 se proporcionan los valores del factor de aplicación recomendados para el diseño para los diferentes métodos de ensayo y medición in situ. Este factor de aplicación se ha obtenido a partir de valores de las cargas hidráulicas empleadas en la práctica en sistemas reales, en los que se han empleado cargas de diseño recomendadas basadas en los valores medidos de la conductividad hidráulica mínima de la columna de suelo. (Metcalf y Eddy, 1998).

Tabla 4.1 Valores típicos del factor F de aplicación.

Medidas sobre el terreno	Factor de aplicación, F
Ensayo de infiltración en balsas.	10-15% de la velocidad de infiltración mínima media
Permeámetro con entrada de aire e infiltrómetro de cilindro.	2-4% de la velocidad de infiltración mínima media.
Conductividad hidráulica vertical.	4-10% de la conductividad del estrato más restrictivo del suelo

En suelos con varios horizontes el valor de la conductividad hidráulica mínima se estima como la media de las conductividades hidráulicas de los horizontes que forman el suelo, determinadas in situ. (Bower en Asano, 1985).

En caso de que exista algún horizonte más impermeable, el diseño debe realizarse en base a la conductividad hidráulica de ese horizonte, independientemente de su espesor. En algunos casos en que aparecen cerca de la superficie depósitos de sales o arcilla, desde el punto de vista económico, puede resultar más ventajoso el eliminar el estrato restrictivo y colocar la superficie de infiltración en el estrato siguiente.

Tanto las medidas de infiltración como las de conductividad hidráulica deben determinarse in situ y con técnicas establecidas. En los casos en que para la construcción del sistema sea necesario realizar movimientos de tierras, las medidas de infiltración y de conductividad hidráulica deben tomarse en el nivel del suelo donde se va a construir la instalación y no en el suelo original, ya que las medidas pueden ser muy diferentes.

Cálculo de la superficie de infiltración

El área de infiltración puede ser calculada mediante la fórmula siguiente: (EPA, 1984)

$$A = \frac{(1,9 \cdot Q)}{(L_w \cdot P)}$$

Donde:

A= Área de tratamiento en ha.

Q= Caudal diario en m³/día.

L_w= carga hidráulica anual de diseño en m/año (calculada en el apartado anterior).

P= Periodo de operación en semanas/año.

Para un periodo de operación de un año (52 semanas aproximadamente) la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$A = \frac{(0,0365 \cdot Q)}{L_w}$$

Tanto el periodo de operación como el caudal que se va a aportar, se determinará en el diseño de la instalación en función de la capacidad del medio y de nuestras necesidades. Sin embargo, hay que señalar que este cálculo del parámetro L_w sólo es válido para realizar estimaciones preliminares, debiendo ser utilizado para el diseño final el dato que se obtenga experimentalmente.

Este procedimiento que presenta la EPA (1984) se basa en la limitación de los valores de infiltración en el lugar propuesto. Pero medir estos valores es difícil debido a su variabilidad de un lugar a otro en la zona de estudio.

Respecto al caudal, en los casos en que no se regulen los caudales estacionales, se debe emplear para el diseño el máximo caudal medio estacional.

La superficie inicialmente estimada por medio de la ecuación anterior puede precisar una serie de correcciones debido a las condiciones limitantes. Puede ser necesario disponer de espacios adicionales para accesos, zonas de amortiguación, almacenamiento o regulación de caudales, y futuras ampliaciones. Las superficies de terreno necesarias para las instalaciones existentes varían entre 1 y 22 ha por cada 0,05 m³/s. (Metcalf y Eddy, 1998).

James Martel (1988), propone otro procedimiento para calcular la superficie necesaria para la construcción de un sistema de IR, basado en la observación de que la mayoría de los sistemas de IR operan como un proceso discontinuo. En este tipo de procesos el agua es tratada en series de balsas individuales. El agua residual se aplica a cada balsa en una cantidad predeterminada y en función de la duración del periodo de secado. Cuando una balsa está llena o el tiempo de aplicación se ha completado, el flujo es dirigido a la siguiente balsa y en la balsa llena el agua se infiltra y luego se deja que se seque. Después de que la última balsa se haya llenado, el agua es dirigida nuevamente a la primera balsa, y comienza otra vez el ciclo.

Para sistemas de este tipo, que funcionan como un proceso discontinuo, el área total necesaria para la infiltración de agua residual se puede calcular de la siguiente forma:

$$A_T = n \cdot A_b$$

Donde, A_T es el área total; A_b es la media del área mojada de cada balsa y n es el número de balsas necesarias.

El término n , se puede calcular dividiendo el tiempo total del ciclo, t_c , entre el tiempo de aplicación, t_a , para cada balsa.

El término A_b se puede calcular dividiendo el volumen aplicado durante cada ciclo, V , entre la entrada media de agua por ciclo Y , sustituyendo en la ecuación anterior:

$$A_T = \frac{t_c}{t_a} \cdot \left(\frac{V}{Y} \right)$$

Esta ecuación se puede simplificar suponiendo que V puede expresarse como el producto de la media diaria del caudal de diseño Q , y el periodo de aplicación, t_a . Sustituyendo en la ecuación anterior obtenemos:

$$A_T = t_c \cdot \left(\frac{Q}{Y} \right)$$

El tiempo total del ciclo, t_c , se puede estimar en función del objetivo del tratamiento y del tipo de agua residual a emplear, como se muestra en la tabla (EPA 1981) que aparece en James Martel (1988). La media diaria del caudal de diseño, Q puede determinarse de la valoración del alcantarillado y del crecimiento esperado de la población. Lo único desconocido de la ecuación es:

$$Y = 0.48 t_a + 0.12$$

No obstante, aunque este método se use para determinar Y , es recomendable que el área total del sistema se calcule usando la ecuación $A_T = t_c/t_a \cdot (V/Y)$.

Comparado con la aproximación de la EPA (1984), ésta representa una significativa reducción en la complejidad del procedimiento de diseño. Sin embargo, el autor recomienda que hasta que este sistema no esté más experimentado se use en conjunto con el método que propone la EPA.

Elección del ciclo operativo.

El ciclo operativo consiste en la combinación de periodos de aplicación del agua residual y de periodos de secado. Estos ciclos se establecen para permitir la aireación del suelo entre periodos de aplicación, maximizando así la infiltración, y para proporcionar el tiempo necesario para la descomposición de la materia orgánica acumulada y el desarrollo de transformaciones biológicas como la eliminación del nitrógeno mediante nitrificación.

En la tabla 4.2 se muestran los ciclos operativos recomendados por la EPA para alcanzar cada uno de estos objetivos. (EPA, 1981).

Aunque algunos autores como Metcalf y Eddy (Metcalf y Eddy, 1998) recomiendan que con independencia de la estación o del objetivo que se pretenda alcanzar con los ciclos, los periodos de aplicación de efluentes primarios no deben ser superiores a 1 ó 2 días, para así evitar problemas de colmatación excesiva del suelo, nuestra experiencia indica que en ciertas circunstancias, dependiendo básicamente de la carga total de agua aplicada, y del tipo de materiales que forman el suelo. Se pueden programar ciclos de inundación de siete días, sin que aparezcan problemas relacionados con la colmatación del lecho. Por otro lado, los periodos de secado pueden verse significativamente influidos por la profundidad del nivel freático.

Tabla 4.2 Ciclos operativos típicos de los sistemas de infiltración rápida.

Objetivo del ciclo de recarga	AR aplicada	Estación	Periodo de aplicación (días)	Periodo de secado (días)
Maximización de las velocidades de infiltración.	Primaria	Verano	1-2	5-7
		Invierno	1-2	7-12
	Secundaria	Verano	1-3	5-4
		Invierno	1-3	5-10
Maximización de la eliminación de nitrógeno.	Primaria	Verano	1-2	10-14
		Invierno	1-2	12-16
	Secundaria	Verano	7-9	10-15
		Invierno	9-12	12-16
Maximización de la nitrificación.	Primaria	Verano	1-2	5-7
		Invierno	1-2	7-12
	Secundaria	Verano	1-3	4-5
		Invierno	1-3	5-10

Los ciclos operativos, como hemos visto, varían en función de lo que pretendamos conseguir. En el caso de buscar la eliminación de nitrógeno los vertidos cortos y frecuentes promueven las condiciones aeróbicas del suelo y por tanto hacen que la conversión de amonio a nitrato ocurra rápidamente. Por el contrario los ciclos largos de aplicación, en suelos con poca aireación, favorecen la pérdida de nitrógeno por desnitrificación. La materia orgánica disponible en el perfil del suelo como resultado de las cargas de DBO_5 aplicadas también favorece la desnitrificación.

Cuando lo que se persigue es favorecer la nitrificación, se suelen emplear periodos cortos de aplicación seguidos de periodos de secado relativamente largos. Los sistemas de IR pueden producir un efluente nitrificado con carga de nitrógeno superiores a 67,2 kg/ha/día. La nitrificación es mínima a temperaturas inferiores a 2°C y pH inferiores a 4,5.

La eliminación de DBO_5 y sólidos en suspensión depende del tipo de suelo y de la distancia recorrida a través del mismo. La eliminación de DBO_5 es llevada a cabo en principio por bacterias anaeróbicas y depende de la duración de los periodos de secado en que se airea el suelo. Aunque la carga hidráulica afecta a la eliminación, también están implicados otros factores como son la temperatura, el periodo de secado o el tipo de suelo.

El diseño de un sistema de infiltración rápida se basa, en el supuesto de que toda el agua vertida se va a infiltrar durante el principio del periodo de secado, por lo que la mayor parte de este periodo se va a emplear en la restauración de las condiciones aeróbicas de la parte superior del perfil del suelo. Esto suele requerir una duración del periodo de secado de 0,5 a 2 días, dependiendo del contenido en materia orgánica y del volumen vertido. En los casos en que la restauración de las condiciones aeróbicas es más lenta, puede ser necesario alargar el periodo de secado, llevar a cabo acciones de mantenimiento en el fondo de las balsas, o en casos extremos, eliminar o reemplazar una determinada profundidad de la superficie del suelo.

A veces, para establecer la duración de los ciclos operativos es necesario estimar, tanto la altura que el agua vertida alcanza en las balsas tras terminar el ciclo de humectación como el tiempo que tarda en infiltrarse todo ese agua. Hay varias formas de resolver este problema dependiendo de si existe o no colmatación en el nivel superficial del suelo. Si no existe colmatación superficial se puede aplicar la ecuación propuesta por Stefan:

$$h = h_0 - 2.22 (1-n)^{0.35} (n)^{3.25} k_v t^{0.675}$$

donde:

- h = altura de la lámina de agua en la balsa tras un tiempo t, cm.
- h_0 = altura de la lámina de agua al final del periodo de vertido (a t = 0), cm.
- n = porosidad del suelo (fracción decimal).
- k_v = conductividad hidráulica vertical saturada, cm/h.
- t = tiempo, h

En la aplicación de esta ecuación, es importante recordar que los valores de n y k_v se aplican al frente humectante, por lo que pueden verse afectados por el aumento del crecimiento de microorganismos en la zona cercana a la superficie y hacerlo variar con respecto a los valores que existían antes de que empezara el vertido de agua residual.

Basándonos en los estudios de deVries (deVries, 1972), es esperable que tanto la porosidad como la conductividad hidráulica disminuya entre un 30 y un 60%, siendo las condiciones más desfavorables las de los suelos con textura fina. Usando n y k_v con un valor del 50% del inicial, se pueden obtener resultados razonables.

La balsa estará vacía cuando h=0. Sustituyendo y adaptando la ecuación anterior nos permite estimar el tiempo que tarda en infiltrarse todo el agua que hay en la balsa:

$$t_d \approx \frac{h_0}{k_v} \cdot \left(\frac{0,3}{(1-n)^{0,5} \cdot n^{0,5}} \right)$$

donde: t_d = tiempo que tarda la balsa en vaciarse, (tiempo de drenaje de la balsa), en h.

Cuando existe colmatación superficial, las dos ecuaciones vistas arriba no son válidas ya que están adaptadas a un frente humectante en continuo movimiento hacia abajo, cosa que no ocurre cuando existe una capa colmatada que induce una mayor resistencia hidráulica superficial que el resto del perfil que se encuentra bajo ésta. La EPA (1984) propone una ecuación que puede servir de aproximación para calcular el grado de disminución de la infiltración con el tiempo.

$$L_n \left(\frac{h+d}{h_0+d} \right) = \frac{-k_{vc} t}{d}$$

Donde:

- d = profundidad del estrato superficial colmatado, cm.
- k_{vc} = conductividad hidráulica del nivel colmatado, cm/h.

Los parámetros d y k_{vc} son función de los sólidos en suspensión de agua residual y de las condiciones de operación, es debido a esto, que nunca se conocen con exactitud.

Existen muchas publicaciones que pueden servir para deducir valores probables de estos parámetros (deVries 1972; Repley, 1973; Behuke, 1969).

Por ejemplo, deVries, propone valores para k_{vc} de 0.6 a 1.0 cm/h y para d entre 2 y 2.5 cm. Un detalle a destacar es que ante la existencia de un estrato colmatado, en la ecuación no intervienen las propiedades de los niveles superiores del perfil del suelo.

Hay que apuntar que el uso de estas ecuaciones debe ser únicamente para hacer estimaciones y que, por tanto el empleo de las mismas no debe eximir de la realización de experimentos en campo para obtener los valores reales adecuados a nuestro sistema.

Bouwer (Bower, 2002) propone otra ecuación para calcular los valores de la infiltración en un estrato colmatado, mediante la aplicación de la ecuación de Darcy al flujo a través del mismo:

$$V_i = K_c \left(\frac{H_w - h_{ae}}{L_c} \right)$$

donde:

V_i = Infiltración.

K_c = Conductividad hidráulica del estrato colmatado.

L_c = Espesor del estrato colmatado.

H_w = Profundidad del agua encima del estrato confinante.

h_{ae} = Valores de entrada de aire en la zona no saturada del suelo.

Debido a que el estrato colmatado es con frecuencia muy fino, entre 1mm y 1cm, su espesor real y su conductividad son difíciles de determinar. Por esta razón, K_c y L_c se integran dentro de un parámetro L_c/K_c , que tiene dimensiones de tiempo (normalmente días), denominado resistencia hidráulica R_c , que es el número de días que tarda una cantidad unitaria de agua en moverse a través del estrato colmatado (por unidad de pérdida de potencial) a una pérdida de carga unitaria. Para un sistema dado, R_c se calcula con la ecuación anterior a partir de los valores de infiltración y pérdida de carga medidos a través del estrato colmatado y usando un tensiómetro para medir h_{ae} , aunque también se puede estimar como $2 h_{wer}$. En este caso, el uso de los valores de entrada de aire son más apropiados que los de entrada de agua o succión capilar, debido a que la infiltración normalmente empieza en unas condiciones en que el fondo de la balsa no presenta indicios de colmatación, esto hace que el agua que se vierte inicialmente, se infiltre y se expanda rápidamente por la zona de infiltración, al tener un potencial positivo, y por tanto estar cerca de la saturación.

A medida que la colmatación va aumentando la capacidad de infiltración va disminuyendo, la zona de humectación se vuelve cada vez más insaturada al ir disminuyendo el contenido de agua para producir conductividades hidráulicas numéricamente iguales a los valores de infiltración.

Caudal diario de aplicación

Como se apuntaba al principio de este capítulo, el caudal de aplicación diario (R_a) se calcula en función de la carga hidráulica anual (L_w) y del ciclo operativo. La expresión utilizada por Metcalf y Eddy para ello es la siguiente:

$$R_a = (L_w \text{ mm/año} / 365 \text{ d/año}) \cdot (\text{Duración del ciclo operativo, d} / \text{Periodo de aplicación, d})$$

En los sistemas en que la distribución del agua se lleva a cabo mediante aspersores, el caudal de aplicación medio debería corresponderse con el caudal de aplicación de diseño de los aspersores. Para evitar la acumulación de agua y la escorrentía superficial, este valor debería ser inferior a la velocidad de infiltración media o a la conductividad hidráulica vertical efectiva de la columna de suelo. En los sistemas de balsas de infiltración el caudal de agua vertido en las balsas puede ser superior al caudal de aplicación que, a su vez, puede ser superior a la velocidad de infiltración del suelo. Sin embargo para minimizar la compactación del estrato superficial y evitar posibles efectos secundarios (crecimiento de algas y precipitación química), la altura del agua acumulada en las balsas no debe superar los 0,30 a 0,45 m. (Metcalf y Eddy, 1999).

Cálculo del flujo subsuperficial y de la altura del agua subterránea acumulada bajo las balsas

Para que el diseño de la instalación sea correcto y no produzca problemas en su funcionamiento, es necesario asegurarse de que el suelo tiene la capacidad de transmisión necesaria para conducir todo el agua que se pretende verter lo suficientemente lejos de las balsas de infiltración promoviendo así su depuración durante su tránsito a través del suelo.

Cuando no existe un gradiente lateral suficientemente fuerte, el agua vertida se suele acumular bajo las balsas formando un domo. Si este domo se forma temporalmente, carecerá de importancia en tanto en cuanto no interfiera con la infiltración y se disipe lo suficientemente rápido como para no interferir en el secado y restauración de las condiciones aeróbicas en la parte superficial del perfil del suelo.

Flujo subsuperficial.

La percolación en la zona no saturada bajo las balsas de infiltración es esencialmente vertical y k_v controla el flujo. El nivel freático del agua subterránea, un estrato restrictivo, o alguna barrera en profundidad pueden introducir una componente horizontal y entonces el flujo es controlado por una combinación de k_h y k_v dentro del domo de agua subterránea que se forma.

A partir de los márgenes del domo el flujo es típicamente lateral, por lo que k_h domina.

Cuanto mayor sea el flujo lateral en el lugar de aplicación del agua residual, menor será la cantidad de agua que se acumule bajo las balsas de infiltración. La localización final de las balsas debe hacerse en función de la información aportada por mapas de suelo y agua subterránea y un análisis para asegurarnos que el perfil adyacente tiene la capacidad necesaria para la transmisión lateral del agua residual aplicada. La primera zona afectada será el perímetro alrededor de la zona que ocupan las balsas, ya que será la más

directamente influenciada por el domo de agua residual que se forme debajo. Los análisis deben considerar el potencial y el gradiente del flujo en varias direcciones al alejarse del lugar de aplicación, además de las cargas hidráulicas programadas para cada balsa para estimar qué proporción del agua residual vertida puede fluir en una dirección determinada.

En muchos casos, el agua infiltrada vuelve a emerger en aguas superficiales próximas y dado que se requiere un determinado tiempo de recorrido del agua por la zona no saturada del suelo para que se produzca su depuración, al interaccionar con los componentes del suelo, se hace necesario predecir la posición del nivel freático y este punto de emergencia. En este sentido se hace necesario calcular el tiempo de tránsito desde que el agua aplicada se infiltra en la balsa, hasta que emerge con el agua superficial. La siguiente ecuación ha sido propuesta por la EPA (1981) para calcular el espesor saturado del acuífero en cualquier punto gradiente abajo de la zona donde se sitúan las balsas de infiltración. Este valor se puede convertir en una altura y dibujarse en mapas y perfiles para la identificación de áreas potenciales susceptibles de causar problemas.

$$h = \sqrt{(h_0)^2 - \left(\frac{2Q_i D}{k_h}\right)}$$

donde:

h = espesor saturado de un acuífero no confinado en el punto de interés, m

h_0 = espesor saturado del acuífero no confinado bajo el área de las balsas de infiltración, m.

Q_i = descarga lateral del sistema de flujo no confinado, por unidad de anchura del sistema de flujo, m³/d.m.

D = descarga lateral del área de IR al punto de interés, m.

k_h = conductividad horizontal efectiva del sistema suelo, m/d.

La EPA (1981) propone la siguiente ecuación para determinar Q_i :

$$Q_i = \left(\frac{k_h}{2D_i}\right) \cdot \frac{h_0^2}{h_i^2}$$

Donde:

D_i = Distancia del punto de vertido al frente de humectación m.

h_i = Espesor saturado del acuífero no confinado en el punto D_i

El tiempo del recorrido por el flujo lateral se calcula en función del gradiente hidráulico, de la distancia, de $k_{h'}$ y de la porosidad del suelo. La siguiente ecuación nos muestra como se halla el tiempo de tránsito:

$$t_D = \frac{nD^2}{k_h \cdot (h_0 - h_i)}$$

donde:

t_D = tiempo (días) de tránsito del flujo lateral desde la zona de las balsas hasta que emerge en las aguas superficiales.

n = porosidad del suelo, %.

D = distancia del trayecto que recorre el agua, m.

h_0 = espesor saturado del acuífero en el área ocupada por la balsa de IR, m.

h_i = espesor saturado del acuífero en el punto de emergencia, m.

k_h = conductividad horizontal efectiva del sistema suelo, m/día.

Acumulación de agua subterránea bajo las balsas.

Es de vital importancia conocer la altura que alcanza el domo de agua residual bajo las balsas de infiltración, así como el tiempo que tarda en desaparecer tras la aplicación, porque es necesario tenerlo en cuenta a la hora de establecer tanto el ciclo operativo de la instalación como la carga hidráulica a aplicar.

La altura del domo que formaría el agua residual bajo las balsas se puede predecir, a partir de la transmisividad de la formación, utilizando los métodos desarrollados por Hantush y Glover (Hanstuch y Glover en Ortiz et al, 1979).

También se puede estimar mediante modelos matemáticos. En este sentido, la EPA propone un programa basado en el análisis de Glover (EPA, 1984).

La altura que alcanza el domo de agua depende en gran medida de la geometría de las balsas, y se puede minimizar empleando balsas estrechas y alargadas en lugar de formas cuadradas o circulares. Si en el diseño de las balsas no se puede mantener una distancia vertical mínima hasta el nivel freático, puede ser necesario instalar sistemas de drenaje, o pozos de recuperación.

Configuración de las balsas y programa de aplicación del ARU

Cuando la disponibilidad de terreno para construir el sistema de IR es limitada y los cálculos preliminares de la acumulación de agua debajo de las balsas, hacen prever la presencia de un problema, la única alternativa que existe es el uso de drenaje subsuperficial, para controlar la elevación del nivel piezométrico y permitir la reutilización del agua depurada. Sin embargo, cuando la disponibilidad de terreno no es un factor limitante, con frecuencia es posible permitir el drenaje natural optimizando la configuración del sistema de balsas de IR, así como diseñando un programa de aplicaciones eficaz para este fin; por ejemplo colocando las mismas a lo largo, una al lado de otra y programando un ciclo operativo para las balsas de manera que no se produzca aplicación de ARU en dos balsas consecutivas a la vez.

Problemas de diseño en climas fríos

En climas fríos pueden presentarse diversos problemas que hagan el sistema de IR menos eficiente en invierno que en otras épocas del año:

- La superficie del agua vertida puede helarse y, si no se derrite en la siguiente aplicación, la balsa puede quedar inutilizada todo el invierno.
- El suelo al estar muy saturado drena demasiado despacio, con lo que el agua que permanece en los poros del suelo en su parte más superficial puede congelarse, formando una superficie impermeable al taponar los poros que impide el funcionamiento del sistema.
- Los procesos biológicos se ven retardados, o incluso cesan por completo.

Diseño de las balsas de infiltración

Tanto la forma como la disposición de las balsas de IR no tienen un patrón establecido, lo único que se persigue es utilizar todo el área que se posea en la excavación de las balsas, dejando el mínimo espacio para los diques de separación. Otro criterio para llevar a cabo una disposición adecuada de las balsas, es la facilidad de acceso a las mismas del personal de mantenimiento. Por tanto se puede afirmar que no existen reglas establecidas para la configuración y dimensiones de las balsas de infiltración. En los lugares en que se emplean técnicas de construcción apropiadas aparecen tanto balsas con formas irregulares como cuadrados perfectos.

Al margen de su disposición, el principal problema que pueden presentar las balsas es el de la colmatación, que puede producirse por procesos físicos, biológicos y químicos.

La colmatación por procesos físicos consiste en la acumulación de sólidos orgánicos e inorgánicos que viajan suspendidos en el agua que se pretende verter. También se puede producir colmatación por procesos físicos si el fondo de las balsas contiene una fracción significativa de materiales finos (limos o arcillas > 10%); en estos casos puede ser necesario dejar crecer hierba en el fondo de las balsas con objeto de que se produzca una estabilización. Al inundar las balsas construidas sobre suelos finos parte de la fracción fina de estos suelos puede suspenderse en el agua. La repetida suspensión y deposición de estos materiales sobre la superficie puede reducir los valores de infiltración significativamente.

Un estrato superficial de grava o algún material similar puede evitar la suspensión de los materiales finos, pero la superficie de contacto entre ambos materiales puede que no se seque correctamente, dando lugar al desarrollo de un estrato de colmatación biológica debido, bien a la acumulación de algas o bacterias contenidas en el agua que se va a infiltrar o bien al crecimiento de microorganismos en el suelo que de lugar a la formación de películas biológicas que, o taponan los poros o por lo menos los reducen. Para solucionar esto el único remedio eficaz, conocido hasta ahora es favorecer el crecimiento de hierba en las balsas. Ya que los sistemas de IR tienden a admitir una carga hidráulica reducida, la cobertura de hierba puede realmente aumentar la capacidad de infiltración de la superficie de la balsa.

Respecto a la colmatación debida a procesos químicos ésta incluye la precipitación de carbonato cálcico, yeso, fosfatos y otras sustancias químicas del suelo. Algunas veces esta precipitación está inducida por los aumentos de pH debidos a la presencia de algas, ya que eliminan CO₂ disuelto del agua mediante la fotosíntesis. Las bacterias también producen

gases (nitrógeno y metano) que obstruyen los poros y se acumulan debajo del estrato colmatado formando una barrera de vapor que dificulta o impide la infiltración.

En Bouwer (2002), se presentan una serie de medidas de cómo controlar el proceso de colmatación para evitar que afecte al funcionamiento del sistema.

Diseño de los elementos físicos

Debido a que la infiltración se produce durante la aplicación del agua en las balsas, los diques no tienen que ser demasiado altos, ya que el agua nunca llegará a sobrepasar la altura de los mismos. Sin embargo, se necesita dar a los diques una altura suficiente que les permita servir a múltiples propósitos como el ahorro económico, proporcionar una mayor área en la parte más superficial de las balsas, y reducir la probabilidad de erosión de los materiales finos del dique sobre la superficie de la balsa, que taponaría los poros del suelo, produciendo una reducción de la infiltración en la balsa en cuestión y por tanto un incremento de los costes de mantenimiento. El diseño de las balsas para un funcionamiento temporal, requerirá la construcción de diques más altos de lo normal, así como otras características que no estarían presentes en balsas usadas en un sistema de infiltración rápida típico.

La pendiente interior de los diques suele ser bastante inferior al ángulo crítico del material empleado en la construcción del dique. Si el dique está formado por materiales finos, la pendiente debe protegerse de la erosión recubriéndolo con vegetación o con materiales más gruesos, cuando ésta es menor de 3:1. En pendientes, de hasta 3:1, con una cantidad apreciable de materiales finos se suele construir un montículo en la parte de abajo del interior del dique para prevenir el flujo de materiales finos dentro de la balsa. La anchura de la parte superior del dique debe ser como mínimo de 60 cm, ya que anchuras inferiores provocarían dificultad en la construcción de los mismos al crear problemas de estabilidad. Los diques muy anchos se suelen usar solo en los lugares en que actúan como zonas de acceso a las balsas para el personal de mantenimiento o si el suelo es abundante y económicamente rentable hacerlo.

Los diques tienen que ser compactados para retardar la infiltración lateral a través de ellos de una balsa a otra, y proporcionar el acceso a cada balsa para las labores de



Foto 4.2 El incorrecto diseño de los taludes en los muros de separación entre balsas, puede hacer que la erosión debida a la oscilación continua del nivel del agua, arrastre el material fino al fondo de la balsa acelerando el proceso de colmatación.

mantenimiento, es más, por lo menos un lado de cada balsa debe ser lo suficientemente ancho como para permitir el transporte de los equipos. Muchos sistemas están provistos de rampas de acceso. Un problema que se plantea frecuentemente es la erosión de materiales finos de los diques durante y después de su construcción; para evitarlo, se recomienda que se considere en el diseño el uso de una envoltura porosa en la cara interna de la pendiente del dique. También es recomendable plantar vegetación en la pendiente de los diques para protegerlos de la erosión. En los casos en que se prevea que puedan producirse el rebosamiento accidental de alguna balsa, que pueda acabar sobrepasando el dique, el diseño debe prever la existencia de un rebosadero que permita la desviación del agua sobrante a otra balsa sin peligro de que el dique pueda resultar dañado o de que pueda producirse un arrastre excesivo de materiales finos hacia el fondo de la balsa.

Estructuras de entrada, distribución y transferencia de agua

El factor más importante a tener en cuenta en el diseño de las estructuras de entrada y distribución de agua es la necesidad de repartirla homogéneamente por toda la superficie de la balsa y evitar la erosión de los diques; generalmente se recurre a la construcción de un sistema de tuberías de reparto adecuadamente distribuidas.

Control del flujo

En función del tamaño del sistema existe un amplio rango de posibilidades para el control del flujo del agua, desde las válvulas manuales simples hasta sistemas de operación completamente automatizados. En cualquier caso, es necesario que un operario revise regularmente todas las balsas para ver en qué condiciones se encuentran y realizar los ajustes necesarios.

Es esencial que el diseño proporcione la flexibilidad suficiente para que el operario pueda realizar los ajustes necesarios, tanto en los valores de carga hidráulica como en los de aplicación del agua residual. También es muy importante el elaborar un manual de mantenimiento del sistema para el operario de forma que entienda claramente el concepto de IR, qué tipo de control y ajustes puede realizar y qué consecuencias pueden tener estos ajustes.

4.4 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

El proceso de construcción es una fase crítica en el proceso de puesta a punto de un sistema de infiltración rápida. Los elementos más importantes durante esta fase son: el acondicionamiento de la superficie de infiltración, los movimientos de tierra para la construcción de los diques y los elementos de control del flujo superficial y subsuperficial cuando sean necesarios.

Las superficies de infiltración en las balsas

Las balsas deben localizarse en el lugar en que los materiales que constituyan el lecho filtrante sean los más apropiados, no obstante en numerosas ocasiones se eligen

localizaciones menos adecuadas en base a otros factores como puede ser una topografía favorable al transporte del agua residual por gravedad, aunque esto puede ahorrar mucho dinero en instalaciones de bombeo y en su mantenimiento, a largo plazo no siempre constituye la mejor opción.

En la construcción de un sistema de IR se utiliza maquinaria convencional para los movimientos de tierra. Es necesario asegurar que todo el personal implicado en la construcción del sistema entienda lo antes posible el concepto de IR y la necesidad de evitar algunas acciones que puedan modificar o reducir innecesariamente la conductividad hidráulica de las balsas (compactación de terreno, creación de canales preferenciales, etc.). Además, las especificaciones del contrato deben ser muy explícitas respecto a los procedimientos y limitaciones en los movimientos de tierras.

Los estratos de suelo o zonas que puedan ser utilizadas como lecho filtrante y los de material no apropiado para ello, deben quedar perfectamente delimitados sobre plantas y perfiles antes de la construcción, y debe hacerse un seguimiento continuo de estos materiales durante la construcción, especialmente durante la excavación real y la deposición del material extraído.

Debe también incluirse en el contrato la prohibición de mezclar materiales no utilizables como lecho filtrante, que contengan finos o sustancias orgánicas, con materiales adecuados de alta permeabilidad, ya que esto disminuiría la calidad o idoneidad de los materiales calificados en principio como válidos para ser lecho filtrante.



Foto 4.3 Un incorrecto manejo del suelo puede dar lugar a la aparición de zonas de flujo preferente o hundimientos que dificultan el correcto funcionamiento de las balsas.

Movimientos de tierra

Las especificaciones concretas sobre los movimientos de tierra variarán de un proyecto a otro, dependiendo de si la superficie de infiltración definitiva se coloca sobre suelo virgen, sobre materiales de relleno, sobre un desmonte o sobre una combinación de ellos. En cualquier caso, las especificaciones del proyecto deben ser muy precisas, tanto en el procedimiento a llevar a cabo como en los ensayos en campo que se usen para controlar el proceso de movimiento de tierras. En los casos en que ha sido posible establecer un tamaño efectivo y un coeficiente de uniformidad del suelo en las investigaciones preliminares, estos valores se puede usar, junto con la medida de la infiltración (que debe haber sido correctamente establecida, mediante un infiltrómetro de doble anillo, durante la fase de diseño), para hacer un seguimiento de la evolución de las condiciones del suelo en las balsas durante el proceso de construcción.

Movimiento de tierras en suelos de textura gruesa.

El test de la densidad de campo es el procedimiento normal de control de calidad para la disposición del relleno y otras acciones relacionadas con los movimientos de tierra para la mayoría de las construcciones. Hay ejemplos en los que la densidad de campo es la única forma de controlar la disposición del relleno para las balsas de infiltración, ya que las especificaciones del proyecto pueden requerir que la densidad del relleno en la balsa no exceda de un porcentaje (75-80%) de la densidad óptima.

No obstante, el test de la densidad de campo puede no ser suficiente por si solo para asegurar un control de calidad adecuado durante la construcción del sistema de IR. Es por esta razón que si no se tienen controlados los eventos de lluvia, el contrato de la obra debe ser lo suficientemente flexible como para permitir ciertos retrasos en el tiempo, ya que cuando los suelos están demasiado húmedos no se puede trabajar.

El planeamiento del degradado debe incluir medidas de prevención de la escorrentía superficial en toda la zona de construcción de las balsas, así como aspersores para evitar el levantamiento de polvo en la zona de construcción cuando la maquinaria está trabajando en o cerca de lo que va a ser la superficie final de infiltración.

La superficie final de infiltración en las balsas tiene que estar uniformemente degradada para permitir la distribución de agua residual y la utilización del perfil completo del suelo para el tratamiento. Deben eliminarse las pequeñas depresiones del suelo, que aunque, aparentemente sean insignificantes, desde el punto de vista de la acumulación de sólidos pueden conducir a fallos en la infiltración en estas áreas. Las balsas con un ligero degradado suelen funcionar bien. La construcción normal se esfuerza en conseguir la gradación uniforme requerida (+/- 5 cm es lo típico), que, en muchos suelos, puede producir alguna compactación en el estrato superficial.

Movimientos de tierra en suelos de textura fina.

Se pueden aplicar las mismas precauciones básicas que se han descrito para suelos con textura gruesa. Aunque en este caso, los requerimientos para suelos con contenidos bajos de humedad durante los movimientos de tierra son más importantes. Hay que asumir que

en el diseño se tiene que evitar el relleno de las balsas en los casos en los que el contenido de arcilla o limo exceda del 10%, por tanto, en este apartado sólo vamos a referirnos a los casos en los que haya que realizar desmontes y rellenos con materiales adecuados.

La presencia de una cantidad significativa de limo o arcilla en el estrato más superficial de la balsa de IR puede producir problemas debido a la deposición de esta fracción fina sobre la superficie. El único tratamiento superficial que se ha demostrado que es efectivo en estos casos es realizar una plantación de hierba.

Construcción de surcos y caballones

La construcción de surcos y caballones puede ofrecer ventajas tanto para las balsas vegetadas como para las sin vegetar. Estas construcciones proporcionan un aumento del área superficial de infiltración. También permiten una aireación más rápida del suelo, ya que la parte superior de los caballones ya se ha secado cuando la última aplicación de agua residual se está infiltrando en el surco. Este tipo de construcciones en el fondo de las balsas también abarata el mantenimiento, ya que la acumulación de sólidos se producirá sólo en el fondo de los surcos de forma que los caballones quedarán limpios, de esta manera la necesidad de realizar labores de limpieza se alarga en el tiempo, aunque, por otro lado, los caballones tienen que ser reconstruidos cada cierto tiempo.

Construcción de diques

Los diques utilizados en los sistemas de IR tienen el mismo procedimiento de construcción y de control que los diques convencionales. Para su construcción, se puede emplear aquel material que no es utilizable para la construcción de las balsas de infiltración. Además, es de vital importancia el control de la erosión en los diques durante la construcción, para ello se pueden emplear barreras de limo o de otro tipo, también se pueden vegetar los taludes de los diques, etc. Por último, es necesario prestar una atención especial para evitar que durante la construcción se deposite material procedente del dique dentro de la balsa de infiltración.

Control del flujo subsuperficial y subterráneo

Los sistemas de IR requieren un drenaje adecuado para mantener los valores de infiltración y la eficiencia del tratamiento. Estos valores de infiltración pueden venir limitados por la conductividad hidráulica horizontal del acuífero subyacente. Además, si hay un drenaje insuficiente el suelo puede saturarse, impidiendo así una adecuada reaeración para que se pueda producir la correcta oxidación del amonio.

Es por esta razón que el diseño de las instalaciones debe incluir medidas para favorecer el drenaje, como, por ejemplo, la construcción de zanjas o drenajes subterráneos para interceptar y redirigir el agua subterránea originaria de las proximidades de las balsas de IR. Estos sistemas requieren normalmente un desagüe superficial, pero no diseñado para interceptar el agua residual de percolación sino para el agua subterránea. Estos drenes deben ser instalados en un estadio muy temprano de la construcción, y hay que prestar atención al material que se coloca alrededor y sobre los drenes, ya que, además de ser

compatible con el material original del suelo, debe evitarse que se compacte durante su colocación.

También es aconsejable la construcción de pozos de seguimiento para realizar observaciones rutinarias del flujo y de las características del drenaje durante la construcción. Los pozos deben localizarse en lugares en los que no interfieran con las actividades de construcción y su observación puede ayudarnos a evaluar si será necesario durante el mantenimiento la realización de un trabajo adicional de esta naturaleza.

En algunas ocasiones se ha observado que la realización de una desviación del agua subterránea, puede ser insuficiente para prevenir la interferencia del agua subterránea en el funcionamiento de la balsa debido al aumento estacional del nivel piezométrico.

Por otra parte, el diseño y el plan de obra debe también incluir, en un estadio muy temprano de la construcción, medidas sobre cómo evitar la escorrentía superficial durante la misma. Los elementos temporales que se instalen para evitar la escorrentía se deben eliminar cuando se complete la construcción, siempre y cuando no se vayan a incorporar en el sistema de drenaje definitivo. Dado que la erosión producida por la escorrentía superficial que pueden sufrir los caminos de la zona o las pendientes externas de los diques no será diferente a la ocasionada por la escorrentía producida por una precipitación normal, no es necesario tomar medidas especiales para su control.

Consideraciones finales para la construcción de un sistema de IR

Como conclusión a este apartado se presentan una serie de detalles específicos de este tipo de sistemas, que hay que considerar para su construcción:

1. El drenaje subterráneo solo debe instalarse en suelos saturados, ya que si el nivel freático no varía, o por lo menos no experimenta elevaciones que puedan interferir en el funcionamiento de la instalación, este tipo de drenaje no será necesario, ya que el agua no llegará a los drenes.
2. Se puede usar un filtro de manga en lugar de una envoltura de grava alrededor de las tuberías de plástico usadas para el drenaje en suelos arenosos. Pero estos filtros se pueden obtener cuando se utilizan solos en suelos de materiales más finos como los arcillo-limosos.
3. Las balsas de infiltración una vez construidas deben ararse para aliviar la compactación que se haya podido producir debido al tránsito de la maquinaria por su superficie. Después de arar la superficie hay que alisarla y nivelarla, pero nunca compactarla.
4. Si los suelos en la zona de construcción del sistema tienen un porcentaje variable de arcilla o lino, los suelos con más materiales finos deben apartarse y utilizarlos a modo de barreras, para evitar que material procedente de los diques caiga sobre la superficie de infiltración. Estas barreras si conviene compactarlas, pero no la superficie de infiltración.