



RECONSTRUIR LA CIVILIZACIÓN

Agua y saneamiento

Obtener, potabilizar, distribuir agua y gestionar excretas y aguas residuales.

Edición del 17 de septiembre de 2026 · 04b336f1 · civilizationrebuild.org

Aviso. Información libre y sin garantías. Los artículos marcados como borrador no han superado la revisión técnica. Ante riesgos para la salud o la vida, contrasta siempre con más fuentes.

Dominio público (CC0 1.0): copia, adapta, imprime y distribuye esta obra sin pedir permiso.

Índice

Potabilización **3**

 Hervido del agua 3

 Desinfección solar (SODIS) 9

 Desinfección química del agua con cloro y yodo 18

 Filtro lento de arena y biofiltro de carbón 28

 Filtros de cerámica y carbón 38

Potabilización

Eliminar patógenos y contaminantes del agua: calor, filtración, química y sol, de lo casero a lo industrial.

AGUA Y SANEAMIENTO > POTABILIZACIÓN

Hervido del agua

Hervir agua para matar patógenos, con tiempo ajustado por altitud, enfriado y almacenamiento seguros, y consumo de combustible.

N1 · Cerámica y agricultura · Borrador · civilizationrebuild.org/es/01-agua-y-saneamiento/potabilizacion/hervido-del-agua/

Borrador sin revisión técnica. Puede contener errores: contrasta cifras y procedimientos antes de aplicarlos. Contiene 6 datos marcados como «verificar».

Resumen

Hervir agua destruye prácticamente todas las bacterias, virus y protozoos (incluidos sus quistes y ooquistes) que causan enfermedad, usando solo fuego y un recipiente. Es el método de potabilización biológica más fiable y más fácil de verificar a ojo (basta ver que hierve a borbotones) cuando no hay cloro, filtros certificados ni laboratorio. Resultado esperado y medible: a partir de agua sin turbidez visible, un lote de hasta ~10 L queda microbiológicamente seguro en 15-35 minutos (encender el fuego, calentar y hervir), más 30-60 minutos de enfriado antes de beberlo cómodamente, con un gasto de entre 1,5 y 2,2 kg de leña seca (o 0,4-0,6 kg de carbón vegetal) por cada 10 L en fuego abierto. El hervido **no** elimina productos químicos, metales pesados ni turbidez, y el agua hervida no queda protegida frente a una recontaminación posterior: la seguridad depende tanto de cómo se hierve como de cómo se enfría y se guarda.

Requisitos previos

- **Conocimientos:** ninguno es indispensable para ejecutar el procedimiento tal cual se describe aquí. Ayuda haber decidido antes cómo se capta el agua (fuente más clara posible) y, si el objetivo es reducir el gasto de combustible, comparar con la desinfección solar (SODIS) y con la filtración, artículos previstos en esta misma carpeta.
- **Materiales:**
 - ▶ Agua a tratar, la más clara posible: 2-3 L por persona y día solo para beber (más con calor o trabajo físico).
 - ▶ Combustible: leña seca (humedad <20 %, se astilla con un chasquido en vez de doblarse), o carbón vegetal, o cualquier otra fuente de calor sostenida (gas, estufa eléctrica, brasas).
 - ▶ Un paño de algodón tupido (una tela tipo sari doblada 4-8 veces cumple; ver «Principio de funcionamiento») para prefiltrar si el agua está turbia.
 - ▶ Un contenedor limpio de boca estrecha, con tapa y, si es posible, grifo, dedicado en exclusiva a agua potable, para el almacenamiento posterior.
 - ▶ Un paño grueso o manopla para manipular el recipiente caliente.
- **Herramientas:**
 - ▶ Fuego a cielo abierto o en fogón (N0: tres piedras y leña bastan).
 - ▶ Un recipiente que pueda ponerse directamente sobre las llamas y aguantar hervores repetidos sin agrietarse ni liberar sustancias tóxicas. **Aquí está la decisión de nivel tecnológico de este artículo:** se fija nivel: 1 porque el procedimiento principal (recipiente puesto directamente al fuego) exige cerámica cocida (mínimo N1) o metal (N2); un recipiente puramente N0 —cuero crudo, corteza, cesta impermeabilizada, madera— se quema, se deforma o pierde estanqueidad si se acerca al fuego directo. Sí existe una vía N0 genuina, más lenta y con más pérdidas: calentar piedras al rojo en la hoguera e introducirlas en el agua contenida en un recipiente no resistente al fuego directo («hervido por piedras calientes»). Por su menor eficiencia y mayor riesgo de quemaduras se documenta como variante de menos recursos (ver «Variantes»), no como procedimiento principal.
 - ▶ Un termómetro y/o un indicador WAPI son opcionales (solo necesarios para la variante de pasteurización a menor temperatura, ver «Variantes»).
- **Tiempo y personas:** una persona basta. Por lote de hasta 10 L: 5-10 min para preparar el fuego, 10-20 min para llevar el agua a ebullición (según potencia del fuego y volumen), 1-3 min de hervor sostenido, y 30-60 min de enfriado antes de que resulte cómodo de beber (se puede consumir tibio antes, ya inocuo, si hay urgencia).

Principio de funcionamiento

Por qué el calor mata patógenos

El calor desnaturaliza las proteínas y enzimas de los microorganismos y daña sus ácidos nucleicos; a partir de cierta temperatura, sostenida el tiempo suficiente, el patógeno deja de ser viable o infeccioso. La sensibilidad térmica varía según el tipo de organismo:

- **Bacterias en forma vegetativa** (*E. coli*, *Vibrio cholerae*, *Salmonella*, *Shigella*): se inactivan en segundos a partir de unos 60 °C; a temperatura de ebullición, la destrucción es prácticamente instantánea.
- **Virus entéricos** (rotavirus, norovirus, hepatitis A): algo más resistentes que las bacterias, pero igualmente inactivados en menos de 1 minuto a temperatura de ebullición.
- **Quistes y ooquistes de protozoos** (*Giardia*, *Cryptosporidium*): son los organismos de interés sanitario más resistentes al calor de los que se transmiten habitualmente por el agua. Los ooquistes de *Cryptosporidium* se inactivan en menos de 1 minuto por encima de 70 °C, y los quistes de *Giardia* casi instantáneamente a partir de esa misma temperatura.
- **Esporas bacterianas** (p. ej. *Bacillus*, *Clostridium*): el hervido a 100 °C **no** las destruye de forma fiable; hacen falta temperaturas de autoclave (~121 °C bajo presión) o tiempos muy largos. No son, sin embargo, la causa habitual de enfermedad transmitida por agua de boca en la práctica, por lo que el hervido sigue siendo el método de referencia para uso doméstico, con esta salvedad honesta.

En conjunto, un hervor a borbotones sostenido supera con amplio margen la temperatura y el tiempo que necesita cualquier patógeno entérico común para quedar inactivado.

Ebullición frente a pasteurización

No hace falta llegar a 100 °C para matar patógenos: la pasteurización usa temperaturas más bajas (60-72 °C) durante más tiempo para conseguir el mismo efecto con menos combustible. El estudio de referencia (Ciocchi y Metcalf, 1984) encontró que los coliformes fecales de agua de río se inactivaban a partir de 60 °C, y que mantener el agua por encima de 65 °C la deja durante al menos una hora por encima de la temperatura de pasteurización de la leche (62,8 °C), considerada suficiente para inactivar los patógenos entéricos de interés. El hervido (100 °C, 1-3 min) es más simple de verificar sin termómetro —basta ver el borboteo— y da más margen de seguridad ante variaciones de altitud, turbidez o mala distribución del calor en el recipiente; por eso lo recomiendan como método por defecto la OMS/UNICEF y los CDC. La pasteurización a menor temperatura (variante WAPI, ver «Variantes») es preferible cuando el combustible es el recurso más escaso.

Ajuste por altitud

El agua hierve cuando su presión de vapor iguala la presión atmosférica; a menor presión atmosférica (mayor altitud), el agua hierve a menor temperatura. Esto no invalida el método —incluso a gran altitud la temperatura de ebullición sigue muy por encima de los 70 °C que bastan para los patógenos citados— pero reduce el margen de seguridad, por lo que OMS/UNICEF y los CDC recomiendan alargar el tiempo de hervor por encima de los 2000 m (~6500 pies):

Altitud (m)	Punto de ebullición (°C)	Tiempo de hervor a borbotones
0 (nivel del mar)	100,0	1 minuto
610	97,8	1 minuto
1219	95,7	1 minuto
1829	93,6	1 minuto
~1980 (6500 ft, umbral OMS/CDC)	~93,0	3 minutos desde aquí
2438	91,6	3 minutos
3048	89,6	3 minutos
4572	84,7	3 minutos

Regla práctica: **1 minuto de hervor a borbotones por debajo de 2000 m; 3 minutos a partir de 2000 m.**

Por qué sedimentar y filtrar antes de hervir

El calor no elimina la turbidez ni la materia en suspensión, y el sedimento puede albergar patógenos protegidos del calor en su interior (partículas más grandes tardan más en alcanzar la temperatura letal en su centro) además de consumir combustible de forma innecesaria al calentar materia que no es agua. Filtrar con un paño de algodón

tupido también tiene un efecto documentado por sí mismo: un estudio de campo en Bangladesh (Colwell et al., 2003) mostró que una tela tipo sari doblada 4-8 veces forma un filtro de malla efectiva de unas 20 micras, capaz de retener el zooplankton y fitoplancton al que suele ir adherido *Vibrio cholerae*, y redujo un 48 % los casos de cólera en las aldeas donde se usó. Sedimentar y filtrar antes de hervir es, por tanto, un paso que reduce el gasto de combustible y añade una barrera adicional, no un sustituto del hervido.

Qué NO elimina el hervido

- **Productos químicos disueltos:** pesticidas, disolventes, nitratos, arsénico o flúor en exceso no se destruyen ni se evaporan de forma relevante al hervir; si se hierve mucho tiempo dejando evaporar una fracción notable del agua, la concentración de lo que no se evapora (sales, metales pesados) puede incluso subir ligeramente.
- **Metales pesados** (plomo, mercurio, cadmio, arsénico): no se eliminan hirviendo.
- **Turbidez, color, sabor a sales o mal olor de origen mineral:** el hervido no aclara el agua ni quita sabores salinos; solo la sedimentación, la filtración o la destilación actúan sobre esto.
- Por lo anterior, si el agua tiene sospecha de contaminación por combustible, disolvente o químico industrial, **no debe hervirse para beber:** hay que buscar otra fuente.

Procedimiento

1. **Preparar el agua.** Si hay turbidez visible, dejar sedimentar en un recipiente en reposo durante 30-60 min y trasvasar solo el agua clara de la parte superior sin remover el poso, o filtrar a través de un paño de algodón tupido doblado 4-8 veces (tipo sari, malla efectiva de ~20 micras) atado sobre la boca de otro recipiente limpio. *Criterio de éxito:* el agua se ve transparente (se distingue un texto a través de una capa de 10 cm) y no deja sedimento visible tras 10 minutos en reposo en un vaso.
2. **Elegir el recipiente.** Cerámica cocida sin esmalte de plomo, o metal, con capacidad de al menos 1 L por persona y toma, sin grietas ni fugas, que no haya contenido combustible, pintura ni pesticidas. *Criterio de éxito:* al llenarlo de agua y dejarlo 5 min, no aparecen goteos ni manchas de óxido que se desprendan al tacto.
3. **Llenar el recipiente entre 2/3 y 3/4 de su capacidad,** dejando espacio para el hervor sin que rebose. *Criterio de éxito:* margen de al menos 5 cm entre la superficie del agua y el borde.
4. **Tapar** con una tapa o un objeto plano que no libere sustancias (otra olla, un plato de barro) y poner al fuego a máxima potencia. *Criterio de éxito:* no se ve un chorro continuo de vapor escapando por los lados antes de romper a hervir (tapar ahorra combustible, ver «Cálculos»).
5. **Calentar hasta el hervor a borbotones** («rolling boil»): burbujas grandes que suben desde el fondo de forma continua y no cesan al remover. *Criterio de éxito:* burbujeo visible en toda la superficie (no solo en el borde) durante al menos 10 segundos seguidos.
6. **Mantener el hervor a borbotones** 1 minuto si la altitud del lugar es menor de 2000 m; 3 minutos si es igual o mayor. *Criterio de éxito:* cronometrar desde que se cumple el criterio del paso 5; el hervor no se detiene en ningún momento del intervalo.
7. **Retirar del fuego** con un paño grueso o pinzas (el recipiente y cualquier asa metálica están a más de 90 °C) y destapar alejando la cara y las manos del chorro de vapor. *Criterio de éxito:* nadie entra en contacto directo con el recipiente ni recibe el vapor de frente.
8. **Enfriar** tapado, lejos del alcance de niños, hasta que resulte cómodo de beber. *Criterio de éxito:* el exterior del recipiente está tibio ($\leq 35-40$ °C al tacto), no caliente.
9. **Airear para mejorar el sabor (opcional).** Verter el agua entre dos recipientes limpios 5-10 veces desde una altura de ~30 cm. *Criterio de éxito:* aparecen burbujas finas de aire y el agua pierde el sabor «plano» propio del agua hervida (se debe a la pérdida de aire disuelto durante el hervor).
10. **Guardar** en el contenedor de boca estrecha, tapado, con grifo si es posible, sin introducir manos, vasos ni cazos en el agua. *Criterio de éxito:* el agua solo se sirve por vertido directo o por grifo, nunca sumergiendo un utensilio.

Verificación

- **Visual:** el agua está transparente, sin sedimento ni película en la superficie, y el único olor o sabor distinto del original es el «plano» propio del hervido (que la aireación del paso 9 corrige).
- **De proceso, no de producto:** no existe una prueba de campo sencilla que confirme a posteriori que el agua hervida está libre de patógenos; la garantía viene de haber cumplido tiempo y temperatura (pasos 5-6), no de una comprobación posterior. Si hay termómetro, se puede confirmar que se alcanzó el hervor a borbotones (no solo agua caliente) antes de cronometrar.

- **Importante:** a diferencia de la cloración, el hervido no deja ningún residual protector. Un agua hervida correctamente puede volver a estar contaminada 5 minutos después si se sirve con las manos o en un recipiente sucio; la verificación real de que sigue siendo segura para beber es que se ha manejado siguiendo el paso 10 en todo momento desde que se hirvió.

Errores frecuentes

Síntoma	Causa probable	Solución
Quien bebe agua «hervida» enferma igualmente	Recontaminación durante el enfriado o el almacenamiento (manos, cazo, contenedor sucio)	Usar contenedor de boca estrecha con tapa/grifo; servir sin sumergir utensilios; lavar el contenedor a diario
El agua sabe «plana» o desagradable	Pérdida de aire disuelto durante el hervor	Airear vertiéndola entre dos recipientes antes de beber (paso 9)
Se gasta mucho más combustible del esperado	Recipiente destapado, fuego expuesto al viento, leña húmeda	Tapar el recipiente; proteger el fuego del viento; usar leña con menos del 20 % de humedad o una estufa eficiente
El agua sigue turbia después de hervir	Se hirvió agua con sedimento sin decantar ni filtrar antes	Sedimentar y/o filtrar con tela antes de hervir (paso 1); el hervido no aclara el agua
Sabor extraño o metálico tras usar cierto recipiente	Recipiente inadecuado: plástico no apto para calor, esmalte con plomo, o contenedor que tuvo combustible/pesticida	Usar solo cerámica cocida sin esmalte de plomo, o metal dedicado en exclusiva a agua (ver «Seguridad»)
El hervor no da suficiente margen de seguridad en zona alta	No se ajustó el tiempo a la altitud	Hervir 3 minutos en vez de 1 por encima de 2000 m (ver tabla de altitud)

Seguridad

- **Quemaduras y escaldaduras (el riesgo principal de este procedimiento):** el vapor a 100 °C causa quemaduras más profundas que el agua líquida a la misma temperatura, porque libera una cantidad grande de calor adicional al condensarse sobre la piel. Usar siempre paño grueso o manopla para mover el recipiente; destapar alejando cara y manos del chorro de vapor; asegurar que el recipiente queda estable sobre el fuego y no puede volcarse; mantener a los niños fuera del alcance del fuego y del recipiente caliente en todo momento, incluido durante el enfriado.
 - ▶ **Qué hacer ante una quemadura:** enfriar de inmediato con agua corriente tibia o fría (no helada) durante 10-20 minutos; no aplicar hielo directo ni pasta de dientes ni remedios caseros sobre la quemadura; no reventar ampollas; cubrir con un paño limpio y no adherente. Buscar atención médica si la quemadura es mayor que la palma de la mano de quien la sufre, si afecta a cara, manos, pliegues o genitales, o si aparecen ampollas extensas.
- **Intoxicación por humo:** si se hierve con leña o carbón en un espacio cerrado o mal ventilado, hay riesgo de intoxicación por monóxido de carbono, que es inodoro y puede ser mortal. Hervir siempre al aire libre, bajo una salida de humos, o con ventilación cruzada asegurada.
- **Recipientes válidos:** cerámica cocida sin esmaltes de plomo o cadmio (algunos esmaltes brillantes antiguos o artesanales los contienen y el calor y la acidez favorecen que se disuelvan hacia el agua), o metal (acero inoxidable, aluminio, hierro) dedicado en exclusiva a uso alimentario.
- **Recipientes inválidos:**
 - ▶ Plástico no certificado para contacto con calor directo: puede deformarse, arder o liberar compuestos hacia el agua.
 - ▶ Cualquier contenedor que haya tenido combustible, disolvente, pintura o pesticida: el hervido no elimina esos residuos químicos aunque el agua quede libre de patógenos.
 - ▶ Cerámica con esmalte de plomo o cadmio.
 - ▶ Metal galvanizado para hervidos repetidos y prolongados: el recubrimiento de zinc puede degradarse con el uso continuado y pasar al agua en exceso (**verificar**; la magnitud del riesgo depende del estado del recubrimiento y de cuántas veces se reutilice).
- **Piedras para la variante de hervido por piedras calientes (ver «Variantes»):** nunca usar piedras de río, porosas o que hayan estado húmedas por dentro: el vapor atrapado en sus poros puede hacerlas estallar violentamente.

tamente al calentarlas, proyectando fragmentos. Usar piedras densas, secas y sin fisuras visibles, y calentarlas siempre lejos de la cara.

- **Recordatorio:** el hervido no protege frente a químicos ni metales pesados (ver «Qué NO elimina el hervido» en «Principio de funcionamiento»); si se sospecha ese tipo de contaminación, hervir no basta.

Variantes

- **Con menos recursos (N0, sin cerámica ni metal): hervido por piedras calientes.** Se calientan piedras densas, secas y no porosas al rojo vivo en el fuego durante 20-30 min, y se introducen una a una con pinzas de madera verde o un palo bifurcado en el agua, contenida en un recipiente que resiste el agua pero no el fuego directo (cuero crudo, corteza de árbol cosida, cesta muy tupida impermeabilizada con arcilla o resina, tronco ahuecado). Hacen falta aproximadamente 3-5 piedras del tamaño de un puño (~0,5 kg cada una) por litro de agua para alcanzar el hervor, reponiendo piedras según se enfrían (verificar cifra exacta; depende mucho del tipo de piedra y del tamaño del fuego). Es una técnica con historial de uso documentado en culturas que no disponían de recipientes resistentes al fuego. *Se pierde:* eficiencia energética (mucho calor se queda en las piedras que no llegan a sumergirse del todo), más tiempo y mano de obra, mayor riesgo de quemaduras por salpicaduras y de estallido de piedras porosas. *Se gana:* no depender de cerámica cocida ni de metal.
- **Con más recursos (N2 en adelante):** hervidor metálico con tapa ajustada y asa aislada del calor; estufa de gas o eléctrica con control de potencia, que llega antes al hervor y sin humo; a partir de N3, hervidor eléctrico con corte automático al hervir (menos vigilancia necesaria); a escala industrial (N3-N4), pasteurizadores de flujo continuo con intercambiador de calor que recupera parte del calor del agua ya tratada para precalentar la entrante, reduciendo mucho el consumo de combustible por litro.
- **Variante de pasteurización a menor temperatura con indicador (WAPI):** en vez de llevar el agua a ebullición, se calienta (al fuego, en cocina solar tipo caja, o sobre brasas) hasta mantenerla a 65 °C usando un indicador WAPI —un tubo de policarbonato con un tapón de cera calibrado para fundir a esa temperatura, desarrollado por Fred Barrett y Dale Andreatta para Solar Cookers International— o, sin WAPI, con un termómetro. El fundamento (Ciochetti y Metcalf, 1984) es que a partir de 60 °C se inactivan los coliformes fecales, y manteniendo el agua por encima de 65 °C se supera con margen la temperatura de pasteurización de la leche (62,8 °C), suficiente para los patógenos entéricos de interés. *Ventaja:* ahorra una parte importante del combustible frente a hervir, al no hacer falta llegar a 100 °C ni mantener el hervor. *Desventaja:* exige controlar la temperatura con más precisión que «ver que hierve»; no destruye esporas bacterianas termorresistentes (poco relevantes en agua de boca); fabricar un WAPI requiere materiales y calibración de nivel N3-N4, aunque un WAPI ya fabricado se reutiliza miles de veces. Recomendable cuando el combustible es el recurso más escaso y hay forma de controlar la temperatura con fiabilidad.
- **Escalado a aldea:** hervir en calderos comunales de 20-200 L sobre un fuego compartido o en una cocina comunitaria, por turnos. La relación superficie/volumen es menor cuanto más grande el caldero, lo que reduce las pérdidas relativas de calor y el combustible por litro frente a hervir en lotes pequeños. A cambio, aumenta el riesgo de recontaminación (más personas metiendo cazos o recipientes en el mismo caldero) y hace falta organizar el reparto en contenedores individuales de boca estrecha y garantizar un suministro de combustible centralizado, que suele ser el verdadero cuello de botella: la OMS/UNICEF señalan el alto coste y consumo de combustible como la principal limitación del hervido a gran escala frente a la cloración centralizada, que resulta mucho más barata por litro. Cuando sea posible, reservar el hervido comunitario para quien no tenga acceso a cloro, y tratarlo como solución de transición.

Cálculos

Energía teórica para hervir 10 L de agua

Datos: calor específico del agua $c = 4,186 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; masa de agua $m = 10 \text{ kg}$ (10 L); temperatura inicial 20 °C, final 100 °C (a nivel del mar); $\Delta T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Energía mínima que debe recibir el agua (sin contar pérdidas ni el tiempo de hervor sostenido):

$$Q = m \times c \times \Delta T = 10 \text{ kg} \times 4,186 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}) \times 80 \text{ }^\circ\text{C} = 3349 \text{ kJ} \approx 3,35 \text{ MJ}$$

En la práctica, la mayor parte del calor de un fuego se pierde al aire y al entorno en vez de pasar al agua, así que hace falta bastante más combustible que esta cifra teórica.

Con fuego abierto de tres piedras (eficiencia térmica real 10-15 %, verificar)

Energía de leña necesaria = $3,35 \text{ MJ} / 0,10 \text{ a } 0,15 = 22,3 \text{ a } 33,5 \text{ MJ}$

Con leña seca al aire (poder calorífico $\approx 15 \text{ MJ/kg}$):

Masa de leña $\approx 22,3/15 \text{ a } 33,5/15 = 1,5 \text{ a } 2,2 \text{ kg}$ por cada 10 L ($\approx 150\text{-}220 \text{ g}$ por litro)

Con estufa mejorada tipo rocket (eficiencia 25-40 %)

Energía de leña necesaria = $3,35/0,25 \text{ a } 3,35/0,40 = 8,4 \text{ a } 13,4 \text{ MJ}$

Masa de leña $\approx 0,56 \text{ a } 0,9 \text{ kg}$ por cada 10 L ($\approx 56\text{-}90 \text{ g}$ por litro)

Es decir, entre 2 y 3 veces menos leña que con fuego abierto, coherente con los ahorros de combustible del orden del 40-60 % que citan comparativas de campo entre fuego de tres piedras y estufas rocket (verificar cifra exacta según el estudio).

Con carbón vegetal (28-30 MJ/kg) y estufa tipo «jiko» (eficiencia 20-30 %, verificar)

Energía necesaria = $3,35/0,20 \text{ a } 3,35/0,30 = 11,2 \text{ a } 16,75 \text{ MJ}$

Masa de carbón $\approx 0,37 \text{ a } 0,6 \text{ kg}$ por cada 10 L ($\approx 37\text{-}60 \text{ g}$ por litro)

Efecto de la tapa

Tapar el recipiente reduce el consumo de combustible para hervir un 20-35 % frente a hervir destapado (estimación general de física de cocción, no específica de potabilización de agua). Aplicado al fuego abierto de tres piedras, esto podría bajar el consumo a aproximadamente 1-1,8 kg de leña por cada 10 L.

Nota de honestidad: todas las cifras de masa de combustible de esta sección son una estimación de orden de magnitud a partir de eficiencias publicadas para distintos tipos de fuego/estufa; el consumo real depende mucho de la humedad de la leña, el viento, el tamaño del fuego, la forma del recipiente y la experiencia de quien lo maneja. Están marcadas como estimación, no como valor exacto reproducible.

Fuentes

- CDC. «How to Make Water Safe in an Emergency». Water, Sanitation, and Hygiene (WASH)-related Emergencies and Outbreaks. <https://www.cdc.gov/water-emergency/about/index.html>
- OMS/UNICEF Joint Monitoring Programme. «Boil Water», Technical Brief sobre opciones de tratamiento doméstico del agua. <https://iris.who.int>
- OMS. *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4.^a ed., 2011.
- Ciochetti, D.A. y Metcalf, R.H. (1984). «Pasteurization of Naturally Contaminated Water with Solar Energy». *Applied and Environmental Microbiology*, 47(2), 223-228.
- Solar Cookers International / Engineering for Change. «Water Pasteurization Indicator (WAPI)».
- Colwell, R.R. et al. (2003). «Reduction of Cholera in Bangladeshi Villages by Simple Filtration». *PNAS*, 100(3), 1051-1055.
- CDC / SSWM (Sustainable Sanitation and Water Management). Recomendaciones de almacenamiento seguro de agua doméstica: contenedores de boca estrecha, con tapa y grifo.
- Engineering ToolBox. «Water - Boiling Points vs. Altitude». <https://www.engineeringtoolbox.com>
- FAO. «Wood Energy - Basic Knowledge» y *Wood Fuels Handbook* (poder calorífico de leña y carbón vegetal). <https://www.fao.org>
- Comparativas de eficiencia térmica de cocinas (fuego de tres piedras frente a estufas rocket), Aprovecho Research Center y estudios de campo asociados — rangos marcados (verificar) por variar sensiblemente entre estudios.

Relacionados: Desinfección solar (SODIS) (p. 9) Desinfección química del agua con cloro y yodo (p. 18) Filtro lento de arena y biofiltro de carbón (p. 28) Filtros de cerámica y carbón (p. 38)

AGUA Y SANEAMIENTO › POTABILIZACIÓN

Desinfección solar (SODIS)

Desinfectar agua clara al sol en botellas PET: turbidez, tiempos según nubosidad, qué no elimina, almacenamiento y verificación.

N0 · Materiales naturales · Borrador · civilizationrebuild.org/es/01-agua-y-saneamiento/potabilizacion/desinfeccion-solar-sodis/

Borrador sin revisión técnica. Puede contener errores: contrasta cifras y procedimientos antes de aplicarlos. Contiene 1 dato marcado como «verificar».

Resumen

La desinfección solar (SODIS, del inglés *solar water disinfection*) consiste en llenar botellas transparentes de plástico PET de 2 L o menos con agua clara y dejarlas tumbadas al sol directo un día completo (mínimo 6 horas que incluyan el mediodía), o dos días seguidos si el cielo está más de la mitad cubierto. La radiación UV-A y el calentamiento del agua inactivan la mayor parte de las bacterias que causan diarrea y cólera, y parte de los virus y protozoos. No gasta combustible ni productos químicos y funciona con botellas recuperadas, por lo que es la opción de partida cuando no hay leña ni cloro. Resultado esperado y medible: con agua de turbidez inferior a 30 NTU y buen sol, una reducción de bacterias fecales del orden de 3 logaritmos (99,9 %) en 1 día, a razón de 2 L por botella expuesta (Meierhofer y Wegelin, 2002). **No** esteriliza, **no** quita químicos ni turbidez, es débil frente a *Cryptosporidium* y muchos virus, y no sirve con lluvia continua ni para agua de biberones.

Requisitos previos

- **Conocimientos:** ninguno indispensable. Conviene conocer el hervido del agua (p. 3), que es la alternativa obligatoria para lactantes, enfermos y días de lluvia, y la filtración (filtro lento de arena (p. 28)) como pretratamiento del agua turbia.
- **Materiales:**
 - ▶ Botellas de PET transparentes e incoloras (o con leve tinte azulado), de 0,3 a 2 L, con tapón de rosca que cierre estanco. Cantidad orientativa: **4 botellas de 2 L por persona** (2 al sol y 2 listas para beber), según la pauta de Eawag (Meierhofer y Wegelin, 2002); con cielos nublados frecuentes hacen falta más o complementar hirviendo (ver «Cálculos»). Cómo reconocer el PET: ver paso 1.
 - ▶ Jabón o ceniza y un cepillo o un puñado de arena limpia para el primer lavado.
 - ▶ Un soporte donde tumbar las botellas al sol: chapa ondulada metálica (la mejor), tejado, chapa de aluminio o cualquier superficie oscura o reflectante sin sombras.
 - ▶ Un periódico o papel con letras grandes (titulares) para la prueba de turbidez.
 - ▶ Un paño de algodón tupido o un filtro de arena si el agua viene turbia.
 - ▶ Opcional: termómetro, indicador WAPI y un kit de análisis de *E. coli* (ver «Verificación»).
- **Herramientas:** ninguna fabricada. **Decisión de nivel tecnológico:** se fija nivel: 0 porque el procedimiento principal no exige fabricar nada: basta sol, agua y botellas PET recuperadas, que abundarán en los primeros años tras un colapso (fase F0). El PET no se puede fabricar hasta N4, así que el método es sostenible solo mientras duren las botellas recuperadas; su sustituto fabricable son las botellas de vidrio claro (N2), con las reservas explicadas en «Variantes». Un recipiente puramente N0 (calabaza, cuero, cerámica) es opaco a la UV-A y no sirve para SODIS; con él solo cabe hervir o pasteurizar.
- **Tiempo y personas:** una persona. Hay que contar con un trabajo diario de llenar, colocar, retirar y marcar botellas, más 6 h a 2 días de espera sin atención; el manual de 2016 solo lo califica de «demanda diaria de trabajo relativamente alta» y no da minutos por botella: cronometrar la primera semana para planificar (ver «Cálculos»). Recomendación de Eawag: que al menos 2 personas de cada casa sepan aplicarlo y una sea la responsable diaria (Meierhofer y Wegelin, 2002).

Principio de funcionamiento

Dos efectos del sol y su sinergia

1. **Radiación UV-A (320-400 nm) y violeta visible.** La UV-B que llega al suelo mata microorganismos dañando directamente su ADN, pero el PET la absorbe casi toda. Lo que sí atraviesa la botella es la UV-A, que genera en el agua **especies reactivas de oxígeno** (oxígeno singlete, peróxido de hidrógeno, radical hidroxilo) a partir del oxígeno disuelto y de sustancias fotosensibles; estas dañan membranas, enzimas y ADN de los patógenos (Luzi

et al., 2016, cap. 2.1). Por eso la desinfección depende de que la luz penetre (agua clara, poca profundidad) y de que haya oxígeno disuelto.

2. **Calor (infrarrojo).** El agua de la botella se calienta. Por sí solo, el calor inactiva patógenos en 60 minutos a temperaturas entre 45 °C (*Vibrio cholerae*) y 63 °C (enterovirus) (Luzi et al., 2016, cap. 2.2.7).
3. **Sinergia por encima de 45-50 °C.** Juntos, los dos efectos suman mucho más que por separado. A 30 °C hace falta una dosis de unos **555 Wh/m²** (350-450 nm, equivalente a unas 5-6 h de sol de mediodía de verano en latitudes medias: ~5 h según Wegelin et al., 1994 y la tabla 5 de Luzi et al., 2016; ~6 h según Meierhofer y Wegelin, 2002, p. 12) para reducir 3 logaritmos los coliformes fecales; a 50 °C bastan unos 140 Wh/m², del orden de 1 h de exposición (Wegelin et al., 1994; Meierhofer y Wegelin, 2002). El manual de 2016 lo resume diciendo que a 50 °C la dosis o el tiempo necesarios se reducen **hasta en dos tercios** (Luzi et al., 2016, cap. 2.2.7). Por debajo de unos 45 °C la dependencia de la temperatura es débil.

Consecuencia práctica: la sinergia explica por qué SODIS funciona mejor en climas cálidos, pero **el manual de 2016 no recomienda acortar el tiempo** de exposición: la temperatura del agua cambia a lo largo del día, una lectura puntual no demuestra cuánto tiempo estuvo por encima de 50 °C, y la norma de 6 h o 2 días lleva margen de seguridad incorporado (Luzi et al., 2016, cap. 2.2.7 y recuadro 6).

Variables que mandan y su margen

Variable	Valor recomendado	Qué pasa si se sale del margen
Intensidad solar	$\geq 500 \text{ W/m}^2$ (todo el espectro) durante unas 5-6 h	Con cielo totalmente cubierto la UV-A cae a ~1/3: hace falta acumular 2 días (Meierhofer y Wegelin, 2002)
Turbidez	$< 30 \text{ NTU}$	Las partículas absorben y dispersan la UV-A y protegen a los microbios: pretratar (paso 3)
Profundidad del agua	$\leq 10 \text{ cm}$	Con agua de 26 NTU, a 10 cm de profundidad llega solo ~50 % de la UV-A (Sommer et al., 1997)
Volumen de la botella	$\leq 2 \text{ L}$	En China, botellas de vidrio de 2,5 L dejaron sin coliformes solo el 72 % de las muestras; con PET de 1,25 L, el 99,2 % (Meierhofer y Wegelin, 2002)
Material	PET transparente incoloro	Botellas de color (marrón, verde) bloquean la UV-A; el vidrio de ventana de 2 mm casi no la deja pasar
Oxígeno disuelto	Agua aireada ($\approx$ saturación)	Al 50 % de saturación, la inactivación de <i>E. coli</i> va a la mitad de velocidad (Reed, 1997, citado en Luzi et al., 2016)
Color y materia orgánica disuelta	Lo mínimo	Agua muy coloreada (té, turba) alarga el tiempo necesario; no hay prueba sencilla para medirlo

Latitudes adecuadas

- **Región más favorable:** entre 15° y 35° de latitud (norte y sur): zonas semiáridas con mucha radiación directa y poca nube.
- **Segunda más favorable:** entre el ecuador y 15° de latitud: mucha radiación, pero más nubosidad y radiación difusa (Meierhofer y Wegelin, 2002, cap. 2.3).
- **Más allá de 30-35°** (toda la España peninsular, entre 36° y 44° N; Canarias, hacia 28° N, sí queda en la franja favorable): Eawag advierte que sus pautas de exposición **no son aplicables** más allá de 30° N/S (Luzi et al., 2016, recuadro 6). No hay pauta oficial para estas latitudes. En altitud (Altiplano boliviano, meseta china) SODIS ha funcionado bien pese al frío porque la UV es intensa.
- **Criterio propuesto por este proyecto para latitudes altas (extrapolación, no pauta de Eawag):** la tabla 5 del manual de 2016 estima una dosis umbral de $\approx 5,7 \text{ kWh/m}^2$ de radiación de espectro completo acumulada durante la exposición. De ahí se deduce, mes a mes, según la **irradiación global diaria media sobre superficie horizontal** (valores mensuales en el atlas de radiación solar de AEMET o en PVGIS):

Irradiación global diaria media del mes	Pauta
$> \approx 6 \text{ kWh/m}^2$	1 día completo en días despejados; 2 días si hay más del 50 % de nubes
$\approx 3 \text{ a } 6 \text{ kWh/m}^2$	2 días completos consecutivos como norma, solo con días mayoritariamente despejados
$< \approx 3 \text{ kWh/m}^2$	No usar SODIS: hervir o pasteurizar

Los umbrales de 3 y 6 kWh/m² son un razonamiento propio sin validación de campo (verificar). No son del todo conservadores: en invierno la fracción UV-A de la radiación global es aún menor que en verano y el agua apenas se calienta, así que en los meses próximos al límite inferior conviene hervir, y antes de adoptar SODIS en estas latitudes conviene comprobarlo con un análisis de *E. coli* («Verificación»).

Qué elimina y qué no

Reducciones típicas tras 6 h en botella PET en países tropicales, con agua a menos de 40 °C (Luzi et al., 2016, tablas 1-4). LRV = logaritmos de reducción (1 log = 90 %, 2 log = 99 %, 3 log = 99,9 %).

Organismo	LRV en 6 h	Comentario
<i>E. coli</i>	2-5	Indicador de contaminación fecal; ~1 día para 3 log
<i>Vibrio cholerae</i>	3-5	Muy sensible: ~3 h para 3 log
<i>Salmonella</i> , <i>Shigella</i>	2-4	<i>Salmonella</i> puede recrecer tras el tratamiento
<i>Campylobacter jejuni</i>	> 4	Sensible
Rotavirus bovino	0,5-1	> 20 h para 3 log
Poliovirus, adenovirus, coxsackievirus	Muy baja	Casi no afectados en PET (la botella filtra la UV-B)
Quistes de <i>Giardia</i>	2 a > 3	Similar a las bacterias
Ooquistes de <i>Cryptosporidium</i>	0,3 a > 0,4	Resistente: 10-70 h para 3 log
<i>Acanthamoeba</i>	—	Solo se inactiva por encima de 50 °C
Huevos de <i>Ascaris</i>	1	Poco eficaz

La OMS (GDWQ 4.^a ed., 2011, tabla 7.8) asigna a la desinfección solar reducciones de referencia de 3 log en bacterias, 2 en virus y 2 en protozoos, y máximas de más de 5, 4 y 4 log. Esas cifras engloban a todos los protozoos: *Cryptosporidium* queda muy por debajo (0,3 a > 0,4 log en 6 h, tabla anterior).

SODIS **no elimina**: productos químicos (pesticidas, combustibles, disolventes, nitratos, arsénico, flúor, metales pesados), turbidez, color, sal ni malos sabores. Tampoco esteriliza: las algas y bacterias ambientales inofensivas pueden sobrevivir e incluso crecer en la botella (Meierhofer y Wegelin, 2002).

Recrecimiento

Algunos estudios han observado que *E. coli* o *Salmonella* vuelven a multiplicarse en las 18-24 h siguientes a una exposición insuficiente; otros no ven recrecimiento. Ante la duda, Eawag recomienda guardar el agua en la misma botella, en lugar fresco, y beberla en pocas horas y como mucho en 1-2 días (Luzi et al., 2016, caps. 2.2.8 y 2.4).

Procedimiento

- Elegir las botellas.** Transparentes, incoloras o con un tinte azul muy leve, de 2 L o menos, sin arañazos profundos, sin opacidad ni amarilleo, con tapón que cierre. Identificar el PET: suele llevar el símbolo de reciclaje «1» o «PET». **Descartar** el PVC (brillo azulado en el borde cortado; símbolo «3»; en caso de duda, prueba de llama de «Seguridad»), el policarbonato (símbolo «7», botellas rígidas de garrafa o biberón antiguo: puede liberar bisfenol A) y, en general, cualquier plástico distinto del PET que no esté certificado para agua de bebida (Luzi et al., 2016, cap. 2.2.4); también las botellas de color, las que contuvieron combustible, pesticida, disolvente o aceite industrial, y garrafas de más de 2 L. **Criterio de éxito:** al llenarla y ponerla boca abajo 1 minuto no gotea; mirando a través se lee un texto sin distorsión ni velo blanquecino.
- Lavar la botella la primera vez.** Quitar todas las etiquetas de papel o plástico (hacen sombra). Lavar por dentro con agua, jabón (o ceniza) y un puñado de arena limpia, agitando 30 s; frotar la rosca del cuello y el interior del tapón con un palito o cepillo, que es donde más suciedad queda. Aclarar 2 veces. **Criterio de éxito:** sin olor, sin película al tacto dentro del tapón ni restos visibles en la rosca.
- Comprobar la turbidez del agua.** Llenar la botella hasta arriba, ponerla de pie a la sombra sobre el titular de un periódico corriente y mirarlo en vertical desde la boca de la botella llena, a través de toda la columna de

agua (Luzi et al., 2016, cap. 2.2.5). *Criterio de éxito*: se leen las letras → turbidez inferior a 30 NTU, apta. Con la plantilla original de Eawag (logotipo SODIS de 15 cm), si además se distinguen los rayos finos del dibujo, la turbidez es inferior a 20 NTU (Meierhofer y Wegelin, 2002, p. 15). Si **no** se leen, pretratar el agua antes de seguir:

- Dejarla reposar **1 día** en un recipiente tapado y trasvasar la parte clara sin remover el poso; o
 - filtrarla por un paño de algodón tupido doblado varias veces, o por un filtro de arena; o
 - clarificarla por coagulación y floculación (sulfato de aluminio o semillas trituradas de *Moringa oleifera*; artículo previsto en esta carpeta). Repetir la prueba. Si tras pretratar sigue sin leerse, **no usar SODIS**: hervir o pasteurizar.
4. **Airear y llenar.** Llenar la botella hasta 3/4, cerrarla y agitarla con fuerza unos 20 s; completar después hasta arriba y cerrar bien. La guía de 2002 lo recomendaba siempre; la de 2016 lo considera innecesario porque el agua ya se oxigena al verterla. Es imprescindible con agua estancada y pobre en oxígeno (charcas, cisternas, pozos): ahí conviene agitar o verter varias veces entre dos recipientes desde ~30 cm. *Criterio de éxito*: botella llena hasta el cuello, con como mucho una burbuja pequeña, tapón apretado y sin goteo al inclinarla.
 5. **Preparar el lugar de exposición.** Elegir un sitio que reciba sol directo **desde primera hora hasta media tarde sin ninguna sombra** a lo largo del día (árboles, aleros, paredes, el respaldo de una silla). Poner encima una chapa ondulada metálica o de aluminio, o usar un tejado de chapa o un suelo oscuro. Preferir un soporte a la altura de la cintura antes que subir a tejados. **Hora solar sin reloj**: clavar un palo vertical en suelo llano; el mediodía solar es el momento en que su sombra es más corta. Las «9 h» y «15 h» solares son unas 3 h antes y después de ese momento (un día de prueba con reloj de cualquier tipo, o contando el paso del sol, sirve para calibrarlo). *Criterio de éxito*: observado a las 9, a las 12 y a las 15 h solares, el sitio sigue al sol.
 6. **Exponer.** Colocar las botellas **tumbadas** (horizontales o con leve inclinación), con el lado largo hacia el sol, sin apilarlas ni taparse unas a otras, en las canaladuras de la chapa para que no rueden. Empezar lo antes posible por la mañana. No detrás de un cristal de ventana (bloquea la UV-A). No moverlas ni agitarlas durante la exposición. *Criterio de éxito*: todas las botellas reciben sol en toda su longitud y a mediodía están tibias o calientes al tacto.
 7. **Cronometrar según el cielo.** Estimar la nubosidad a media mañana y a mediodía:

Cielo durante la exposición	Tiempo mínimo
Despejado o con nubes que cubren menos del 50 %	1 día completo: al menos 6 h que incluyan el mediodía (p. ej., de 9 a 15 h solares)
Nubes que cubren más del 50 % o cielo totalmente cubierto	2 días completos consecutivos , sin abrir la botella entre ambos
Lluvia continua o niebla muy densa	No usar SODIS. Beber agua de SODIS guardada, recoger agua de lluvia o hervir

No acortar nunca el tiempo, aunque haga mucho calor o el agua esté muy caliente (Luzi et al., 2016, cap. 2.2.7 y recuadro 6). En latitudes por encima de 30°, aplicar además el criterio mensual de «Latitudes adecuadas». *Criterio de éxito*: se ha cumplido el tiempo de la tabla y en ningún momento la botella quedó a la sombra.

8. **Retirar y marcar.** Recoger las botellas al final de la tarde sin abrirlas y dejarlas en un lugar fresco y a la sombra, separadas de las botellas de agua sin tratar. Marcar las tratadas (tapón de otro color, una muesca, o estantes distintos «crudo» y «listo»). *Criterio de éxito*: cualquier persona de la casa distingue sin dudar una botella tratada de una sin tratar.
9. **Consumir.** Beber directamente de la botella o verter en un vaso limpio, **sin trasvasar** a cántaros o bidones abiertos. Consumir en el mismo día o como mucho en 1-2 días. Si hay que usar otro recipiente, que sea limpio, de boca estrecha, tapado y con grifo o cazo limpio. *Criterio de éxito*: la botella tratada no se abre hasta el momento de beber y nadie introduce en ella dedos ni utensilios.
10. **Mantener las botellas.** Lavar el tapón y la rosca cada semana: es una rutina recomendada por este proyecto, no una pauta de Eawag; la fuente solo documenta que una rosca sucia recontamina el agua tratada (Sacabamba, Bolivia; Meierhofer y Wegelin, 2002, p. 27). Cada mes, mirar cada botella a contraluz y **sustituir** las rayadas, opacas, amarillentas, deformadas o con tapón que gotea: los arañazos y el envejecimiento del plástico reducen la transmisión de UV-A. *Criterio de éxito*: todas las botellas en uso pasan la inspección del paso 1.

Verificación

- **No hay señal visible de que el agua esté desinfectada.** El agua tratada tiene el mismo aspecto que la cruda. La garantía viene de haber cumplido el proceso (turbidez, botella, tiempo, sol sin sombra). Llevar un registro sencillo (fecha, nubosidad, hora de puesta y de retirada) ayuda a detectar fallos.
- **Temperatura (si hay termómetro):** medir a primera hora de la tarde el agua de una botella testigo expuesta junto a las demás. Si supera 50 °C, la sinergia está actuando con holgura, pero **no por ello se acorta el tiempo** (paso 7). En climas cálidos suele quedarse en torno a 40-45 °C (Luzi et al., 2016), lo cual es normal y no invalida las 6 h.
- **Indicador WAPI** (tubo con cera que se funde a la temperatura de pasteurización, ver hervido del agua (p. 3)): si la cera se funde dentro de la botella o del recipiente, el agua alcanzó temperatura de pasteurización con independencia de la UV. Es una prueba de **suficiencia**, no de insuficiencia: que no se funda no significa que SODIS haya fallado.
- **Análisis microbiológico (el único que confirma el resultado):** recuento de *E. coli* o coliformes fecales en agua cruda y tratada con un kit de campo (filtración por membrana e incubación a 44 °C durante 16-18 h; Meierhofer y Wegelin, 2002). Resultado deseable: 0 *E. coli* por 100 ml en el agua tratada; en la clasificación de riesgo de la OMS citada por Eawag, 1-10 por 100 ml es riesgo bajo, 10-100 intermedio, 100-1000 alto y más de 1000 muy alto. Hacerlo al introducir el método, al cambiar de fuente o de tipo de botella, y cada temporada. **No sirven** como indicador ni los coliformes totales ni el recuento total de bacterias, porque bacterias ambientales y algas inocuas crecen en la botella al sol. La ausencia de *E. coli* tampoco garantiza la ausencia de *Cryptosporidium* o virus, más resistentes. Los métodos de campo sin laboratorio se tratarán en el artículo previsto «Análisis básico de calidad del agua».
- **Prueba de validación de botellas nuevas (vidrio o plástico dudoso):** requiere kit de *E. coli*. Exponer en paralelo, con la misma agua, una botella PET de referencia y la botella candidata, y comparar *E. coli* tras el tiempo normal. Solo se adopta la candidata si da el mismo resultado. **Sin kit no hay validación posible:** la botella candidata no se adopta para SODIS.

Errores frecuentes

Síntoma	Causa probable	Solución
Hay diarrea en la familia pese a usar SODIS	Botellas a la sombra parte del día (árbol, alero, respaldo de silla)	Revisar el lugar a las 9, 12 y 15 h; usar chapa en un sitio despejado (paso 5)
Agua «tratada» con <i>E. coli</i>	Rosca y tapón sucios contaminan el agua al beber	Frotar la rosca y el interior del tapón (pasos 2 y 10)
Agua tratada contaminada al analizarla en casa	Se trasvasó a un cántaro o bidón abierto y se sirvió con cazo o manos	Beber de la propia botella; si se trasvasa, recipiente de boca estrecha con tapa y grifo
Se bebe agua recién puesta o a mediodía	Impaciencia, o se tratan 2 tandas en un día con las mismas botellas	Tener siempre reserva (ver «Cálculos»: más botellas en rachas nubladas); nunca acortar el tiempo
Poca eficacia con botellas en pie	Colocación vertical: la luz atraviesa hasta 30 cm de agua	Tumbarlas, con el lado largo hacia el sol (paso 6)
Poca eficacia con agua de río o charca	Turbidez > 30 NTU o agua muy coloreada	Prueba del titular (paso 3); reposar 1 día, filtrar o flocular antes
Resultados peores con unas botellas concretas	Botellas rayadas, opacas, con etiquetas o de color	Quitar etiquetas; sustituir botellas envejecidas; solo incoloras
Botellas deformadas o arrugadas tras la exposición	Agua por encima de ~65 °C en PET (colector o caja muy eficaz)	Quitar el reflector en días muy calurosos o usar vidrio para pasteurizar
Botellas frías a mediodía o con polvo acumulado	No se sacan al sol a diario; se rellenan justo antes de beber	Asignar una persona responsable y un horario fijo
Agua con sabor o aspecto verdoso tras días guardada	Algas y bacterias ambientales crecen en agua almacenada al sol o mucho tiempo	Guardar a la sombra y consumir en 1-2 días

Seguridad

- **Lo que puede matar: la falsa sensación de seguridad.** SODIS reduce mucho el riesgo, pero no lo anula. El cólera, las disenterías y la deshidratación por diarrea matan con rapidez, sobre todo a niños pequeños. Si alguien enferma de diarrea, aplicar rehidratación oral de inmediato (si no hay sobres de SRO, receta casera de la OMS: **1 L de agua limpia —hervida y enfriada—, 6 cucharaditas rasas de azúcar y 1/2 cucharadita rasa de sal**, removido hasta disolver; no poner más sal, preparar a diario y desechar a las 24 h; Rehydration Project), pasar a hervir el agua de toda la casa y buscar atención sanitaria si hay sangre en las heces, fiebre alta, vómitos que impiden beber o signos de deshidratación (boca seca, poca orina, ojos hundidos, letargo).
- **Grupos que NO deben beber agua de SODIS** (Meierhofer y Wegelin, 2002, cap. 3.4): usar solo agua hervida para
 - ▶ la leche en polvo, las papillas y el agua de lactantes y niños menores de ~18 meses;
 - ▶ personas gravemente enfermas o desnutridas;
 - ▶ personas inmunodeprimidas (VIH/sida avanzado, quimioterapia): *Cryptosporidium*, apenas afectado por SODIS, les causa diarrea grave y prolongada;
 - ▶ personas con enfermedades digestivas crónicas.
- **Contaminación química:** SODIS no elimina nada químico. No tratar agua con olor a combustible, disolvente o pesticida, ni de zonas mineras o industriales sin analizar: buscar otra fuente. No reutilizar botellas que hayan contenido sustancias tóxicas.
- **Sustancias del plástico:** los estudios disponibles no encuentran riesgo relevante por migración de sustancias del PET al agua de SODIS: los plastificantes medidos (DEHA, DEHP) quedaron en niveles similares a los de botellas guardadas a oscuras y muy por debajo de los valores guía de la OMS (Schmid et al., 2008, citado en Luzi et al., 2016). El antimonio del PET solo migra de forma apreciable **por encima de 60 °C o con almacenamientos muy largos**: no calentar el PET a propósito por encima de esa temperatura (colectores muy eficaces) ni guardar agua durante semanas al calor. **Nunca** usar policarbonato (símbolo 7).
- **Prueba de llama para distinguir PET de PVC:** el PVC libera humo irritante y tóxico (ácido clorhídrico). Si hay que hacerla, quemar solo un recorte de 1 cm² al aire libre, con pinzas, sin inhalar el humo y lejos de niños. El PET arde con más facilidad y su humo huele dulzón; el del PVC es acre (Meierhofer y Wegelin, 2002).
- **Caídas:** subir botellas llenas (2 kg cada una) a tejados provoca caídas. Preferir un bastidor con chapa a la altura de la cintura; si se usa el tejado, que lo haga siempre la misma persona adulta, con escalera firme.
- **Quemaduras por contacto:** una chapa metálica al sol de mediodía puede quemar al tacto; coger las botellas por el tapón o con un trapo y no apoyar las manos ni dejar que los niños se sienten en ella.
- **Vidrio:** las botellas de vidrio se rompen con facilidad y causan cortes; no usarlas en tejados ni al alcance de niños pequeños.
- **Confusión de botellas:** un niño puede beber de una botella sin tratar. Marcar siempre las tratadas (paso 8) y guardar las crudas aparte.

Variantes

- **Con menos recursos (sin botellas PET):**
 - ▶ Sin recipientes transparentes a la UV-A no hay SODIS. Las alternativas N0-N1 son el hervido y la pasteurización con cerámica al fuego: ver hervido del agua (p. 3).
 - ▶ **Bolsas transparentes de polietileno** (recuperadas): en ensayos dieron una desinfección muy alta por su poca profundidad y mayor superficie, pero Eawag no las recomienda por difíciles de manejar y porque se rompen antes que las botellas (Meierhofer y Wegelin, 2002, p. 24). Solo como recurso de emergencia: respetar la regla general de profundidad de agua ≤ 10 cm (tabla de variables; Sommer et al., 1997), tenderlas planas sin pliegues que hagan sombra y aplicar el mismo tiempo de exposición.
 - ▶ Sin chapa: cualquier suelo oscuro o piedra plana al sol; la mejora de chapas y fondos oscuros es inferior al 30 %, así que su falta no obliga a alargar el tiempo (Luzi et al., 2016, cap. 2.2.3).
- **N2: botellas de vidrio.** El vidrio no se raya ni se deforma con el calor, pero pesa, se rompe y su transmisión de UV-A depende del **contenido de óxido de hierro**: el vidrio de ventana de 2 mm casi no deja pasar UV-A, mientras que las botellas comerciales de bebida incoloras probadas por Eawag transmitían de forma comparable al PET y dieron la misma eficacia (Luzi et al., 2016, recuadro 7). Ese recuadro solo respalda botellas **comerciales** de bebida y recomienda medir la transmitancia UV del vidrio disponible en cada lugar. El vidrio artesanal de N2 suele ser verdoso por el hierro de la arena y en N2 no hay kit de *E. coli* con que validarlo (prueba comparativa de «Verificación»): **sin kit de análisis, el vidrio artesanal no se adopta para SODIS; se usa solo para**

pasteurización solar con control de temperatura (abajo). Si más adelante hay kit, el vidrio candidato debe ser incoloro al mirar el borde de canto, de paredes lo más finas posible y en botellas de ≤ 2 L.

- **Pasteurización solar (con más recursos o climas fríos).** En lugar de depender de la UV, se busca calor: botellas o recipientes con la mitad inferior pintada de negro, dentro de una caja con papel de aluminio o una cocina solar, hasta mantener el agua a más de 65 °C (Ciochetti y Metcalf, 1984; tiempo y criterio en el artículo hervido del agua (p. 3)), con un WAPI o termómetro como comprobación. En una prueba a 32° N, una botella semiennegrecida pasó de 21 °C a 42,5 °C al aire libre y a 66,5 °C dentro de una caja forrada de aluminio entre las 9 y las 14 h (Green, Lifewater, recogido en Meierhofer y Wegelin, 2002). Ventaja: inactiva también protozoos y virus que la UV-A apenas toca, y funciona en recipientes opacos. Inconvenientes: el PET se deforma por encima de ~65 °C (usar vidrio o metal oscuro) y exige comprobar la temperatura. La guía de 2016 ya no promueve pintar de negro las botellas para SODIS normal; en altitud, donde el agua no se calienta, conviene la botella totalmente transparente. El detalle de la pasteurización y del WAPI está en hervido del agua (p. 3).
- **Con más recursos (N3-N4):** reflectores o colectores parabólicos compuestos que concentran la luz (aceleración normalmente inferior al 50 %; Luzi et al., 2016, cap. 2.3); indicadores UV electrónicos o químicos que avisan de la dosis recibida; kits de *E. coli* para vigilar la calidad; combinación con filtración (filtros de cerámica y carbón (p. 38)) para agua turbia o con cloro (p. 18) cuando se necesita protección residual o eficacia frente a virus.
- **Escalado a aldea:** SODIS es un método **doméstico**: se escala multiplicando botellas y hogares, no agrandando recipientes. Hace falta un suministro organizado de botellas PET, puntos de exposición comunales (tejados de chapa de la escuela o del centro de salud) y, sobre todo, formación y visitas de seguimiento: en campo, sin seguimiento, el uso cae con fuerza al acabar la promoción (en Nepal y en Indonesia, alrededor del 21 % de uso años después; Luzi et al., 2016, cap. 3.1.2). Ver «Cálculos».
- **Escalado a ciudad:** no es adecuado. Los reactores solares de gran volumen (unos cientos de litros al día) son técnicamente complicados de construir, limpiar y mantener, y no compiten en coste con la cloración centralizada (Luzi et al., 2016, cap. 2.3). En una ciudad, SODIS solo tiene sentido como respaldo doméstico durante cortes o emergencias.

Eficacia sanitaria observada

Resultados de ensayos de campo (Luzi et al., 2016, tabla 8; CDC, 2008): en niños de 5-16 años en Kenia, odds ratio de diarrea 0,66 (Conroy et al., 1996); en niños menores de 6 años, durante un brote de cólera, 3 casos entre 155 que usaban SODIS frente a 20 entre 144 que no (odds ratio 0,12; Conroy et al., 2001; la tabla 8 de Luzi et al., 2016 lo resume como un 81 % menos de cólera en menores de 5 años, discrepancia con el título del artículo original); en Bolivia, efecto no significativo con solo un 32 % de cumplimiento (Mäusezahl et al., 2009). Los CDC resumen reducciones de diarrea del 9 al 86 % en cuatro ensayos controlados. La diferencia la marca el uso **constante y correcto**: beber aunque sea un 5-10 % de agua sin tratar puede anular casi todo el beneficio (Brown y Clasen, 2012, citado en Luzi et al., 2016).

Cálculos

Botellas para una familia

Datos: 5 personas; agua de bebida mínima de unos 2 L por persona y día en condiciones templadas y hasta 4,5 L con calor y trabajo físico (Howard y Bartram, 2003). Se toma 3 L/persona/día.

Agua diaria = 5 personas $\times$ 3 L = 15 L

Botellas de 2 L que deben terminar su exposición cada día = 15 L / 2 L = 7,5 $\rightarrow$ 8 botellas

Régimen soleado (1 día de exposición):

8 botellas al sol + 8 tratadas para beber mientras tanto = 16 botellas

Régimen nublado (2 días de exposición):

para que cada día terminen 8 botellas hacen falta 2 tandas alternas al sol a la vez:

8 (tanda en su 1.º día) + 8 (tanda en su 2.º día) + 8 tratadas para beber = 24 botellas

Con solo 16 botellas, en una racha nublada salen 8 botellas cada 2 días, es decir, 8 L/día frente a los 15 L/día necesarios: **o se tienen 24 botellas, o en las rachas nubladas se complementa hirviendo** el agua que falte. La pauta de Eawag de 4 botellas por persona (20 para esta familia) tampoco cubre del todo el régimen de 2 días con 3 L/persona/día.

Superficie de exposición

Medir las botellas disponibles tumbadas y añadir unos 2 cm de separación entre ellas. Ejemplo resuelto con una botella que, tumbada y con su separación, ocupe 12 cm × 32 cm:

Superficie por botella $\approx 0,12 \text{ m} \times 0,32 \text{ m} \approx 0,038 \text{ m}^2$
 Familia, régimen soleado (8 al sol) $\approx 8 \times 0,038 \approx 0,31 \text{ m}^2 \rightarrow$ una chapa de 1 m × 0,5 m
 sobra
 Familia, régimen nublado (16 al sol) $\approx 16 \times 0,038 \approx 0,61 \text{ m}^2 \rightarrow$ chapa de 1 m × 0,7 m

Aldea de 200 personas

Agua de bebida = $200 \times 3 \text{ L} = 600 \text{ L/día}$
 Botellas al sol = $600 / 2 = 300 \text{ botellas/día}$
 Superficie = $300 \times 0,038 \approx 11,5 \text{ m}^2$ (≈ 6 chapas onduladas de 2 m × 1 m)
 Inventario régimen soleado = 300 al sol + 300 para beber = 600 botellas
 Inventario régimen nublado = 600 al sol + 300 para beber = 900 botellas (o hervir en rachas nubladas)
 Superficie régimen nublado = $600 \times 0,038 \approx 23 \text{ m}^2$
 Mano de obra = 300 botellas/día × (minutos por botella cronometrados la primera semana)

No hay cifra publicada de minutos por botella (el manual de 2016 solo habla de «demanda diaria de trabajo relativamente alta»): cronometrar en la práctica antes de organizar turnos.

Por eso en aldea conviene que cada hogar trate lo suyo en su casa (reparte la mano de obra y evita trasvases) y reservar la exposición comunal para escuelas y centros de salud.

Fuentes

- Luzi, S.; Tobler, M.; Suter, F.; Meierhofer, R. *SODIS manual: Guidance on solar water disinfection*. Eawag/Sandec, Dübendorf, 2016. ISBN 978-3-906484-59-4. Caps. 2.1-2.4 (mecanismo, tablas 1-4 de inactivación, tabla 5 de dosis, recuadros 6-8 sobre tiempo de exposición, vidrio y seguridad del PET, recrecimiento, almacenamiento) y 3.1 (adopción e impacto en salud, tabla 8). https://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente_material/sodismanual_2016_lr.pdf
- Meierhofer, R.; Wegelin, M. *Solar Water Disinfection: A Guide for the Application of SODIS*. EAWAG/SANDEC, informe n.º 06/02, octubre de 2002. ISBN 3-906484-24-6. Caps. 2.1-2.7 (UV-A y temperatura, clima, prueba de turbidez, oxígeno, materiales, procedimiento) y 3.2-3.4 (eficacia en campo, errores de uso, lactantes y grupos de riesgo). Versión española disponible en [sodis.ch \(manual_s.pdf\)](https://www.sodis.ch/manual_s.pdf).
- CDC. *Household Water Treatment Options in Developing Countries: Solar Disinfection (SODIS)*. Hoja informativa, enero de 2008.
- Wegelin, M. et al. (1994). «Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments». *J Water SRT-Aqua*, 43(3), 154-169 (dosis de 555 Wh/m² y sinergia a 50 °C).
- Sommer, B. et al. (1997). «SODIS: an emerging water treatment process». *J Water SRT-Aqua*, 46(3), 127-137 (atenuación de la UV-A por turbidez y profundidad).
- Conroy, R.M. et al. (1996). «Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Maasai children: a controlled field trial». *The Lancet*, 348, 1695-1697; Conroy, R.M. et al. (2001). «Solar disinfection of drinking water protects against cholera in children under 6 years of age». *Arch Dis Child*, 85, 293-295.
- OMS. *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4.ª ed., 2011, cap. 7, tabla 7.8 (reducciones de patógenos esperadas con tratamientos domésticos, p. 146).
- Rehydration Project. *Oral Rehydration Solutions: Made at Home* (receta casera de SRO de la OMS: 1 L de agua, 6 cucharaditas rasas de azúcar, 1/2 cucharadita rasa de sal).
- AEMET, *Atlas de radiación solar en España*, y Comisión Europea, PVGIS (valores mensuales de irradiación global para aplicar el criterio de latitudes altas).
- Howard, G.; Bartram, J. *Domestic Water Quantity, Service Level and Health*. OMS, Ginebra, 2003.
- Ciochetti, D.A.; Metcalf, R.H. (1984). «Pasteurization of Naturally Contaminated Water with Solar Energy». *Applied and Environmental Microbiology*, 47(2), 223-228.
- Estudios citados de segunda mano a través de Luzi et al. (2016), sin consulta directa: Reed (1997, oxígeno), Schmid et al. (2008, plastificantes), Mäusezahl et al. (2009, Bolivia), Brown y Clasen (2012, consumo de agua sin tratar).

Relacionados: Hervido del agua (p. 3) Filtro lento de arena y biofiltro de carbón (p. 28) Filtros de cerámica y carbón (p. 38)
Desinfección química del agua con cloro y yodo (p. 18)

AGUA Y SANEAMIENTO › POTABILIZACIÓN

Desinfección química del agua con cloro y yodo

Dosis de lejía, hipoclorito cálcico y yodo por litro y por depósito, tiempos de contacto, cloro residual, límites y manejo seguro.

N1 · Cerámica y agricultura · Borrador · civilizationrebuild.org/es/01-agua-y-saneamiento/potabilizacion/desinfeccion-quimica-del-agua-con-cloro-y-yodo/

Borrador sin revisión técnica. Puede contener errores: contrasta cifras y procedimientos antes de aplicarlos.

Resumen

Añadir una dosis medida de cloro (lejía o hipoclorito cálcico) o de yodo a agua clara y esperar un tiempo de contacto inactiva bacterias, virus y la mayoría de quistes de *Giardia*, sin combustible y para cualquier volumen: de un bidón de 20 L a un depósito de varios metros cúbicos. Resultado esperado y medible: con agua clara a 15-30 °C, 20 L quedan desinfectados con unos 1,6 mL de lejía al 5 % (4 mg/L) esperando 60 min a 15 °C o 45 min a 30 °C (basta 30 min para bacterias y virus), y el agua conserva después un **cloro residual libre de 0,2-0,5 mg/L** que la protege de recontaminaciones durante el almacenamiento, cosa que ni el hervido ni la desinfección solar consiguen. Límites honestos: el cloro y el yodo a dosis de campo **no inactivan *Cryptosporidium***, funcionan mal en agua turbia y no eliminan productos químicos. El yodo solo sirve para uso de emergencia de pocas semanas.

Requisitos previos

- **Conocimientos:** ninguno imprescindible. Conviene saber clarificar el agua antes (reposo y filtrado con tela, ver «Procedimiento», paso 1) y conocer los métodos alternativos para cuando falte el reactivo o se sospeche *Cryptosporidium*: Hervido del agua (p. 3), desinfección solar (SODIS) y filtros de cerámica o de arena, en esta misma carpeta.
- **Dependencia de nivel tecnológico (léase antes de planificar):** el *procedimiento* es N1 —medir volúmenes con recipientes cerámicos, contar gotas, esperar—, por eso el artículo lleva nivel: 1. Pero el *reactivo* no lo es: la lejía y el hipoclorito cálcico son productos de la química industrial (N3-N4) y la tintura de yodo o los cristales de yodo también. En un escenario de reconstrucción el reactivo será **recuperado** de existencias (supermercados, piscinas, farmacias, almacenes agrícolas) y se agota; su fabricación local (p. ej. hipoclorito por electrólisis de salmuera) es un tema de química aparte. Mientras haya existencias, este es el método más barato por litro; cuando se acaben, hay que volver al hervido, al sol o a la filtración. Por eso interesa almacenar sobre todo **hipoclorito cálcico granulado**, que dura años, antes que lejía líquida, que se degrada en meses (ver «Principio de funcionamiento»).
- **Materiales (según la opción elegida):**
 - ▶ **Lejía** (hipoclorito sódico) **sin aditivos:** sin perfume, sin detergente, sin espesantes («gel»). En España, busca en la etiqueta «apta para la desinfección del agua de bebida» y la concentración en gramos de cloro activo por litro. **No sirven** las «lejías sin lejía», «con oxígeno activo» o «para ropa de color» (son peróxidos, no cloro).
 - ▶ **Hipoclorito cálcico granulado** del 65-70 % (HTH, «cloro granulado» de piscina) sin estabilizante (ácido cianúrico) ni alguicidas añadidos. 100 g tratan unos 17 m³ a 4 mg/L.
 - ▶ **Yodo** (alternativa): tintura de yodo al 2 %, povidona yodada al 10 % (Betadine y similares), solución de Lugol al 5 %, o cristales de yodo resublimado (4-8 g) en un frasco de vidrio de 30-60 mL con tapa.
 - ▶ Recipientes cerámicos esmaltados, de vidrio o de plástico alimentario para el agua; **nunca metálicos** para las soluciones concentradas (el cloro y el yodo los corroen).
 - ▶ Paño de algodón tupido para prefiltrar.
 - ▶ Opcional: vitamina C (ácido ascórbico) en polvo o carbón vegetal para quitar el sabor.
- **Herramientas:**
 - ▶ Un cuentagotas (N3-N4 si es de plástico; en N1 una caña fina o una paja cortada en bisel) **calibrado:** contar cuántas gotas llenan una medida conocida. Referencia: 20 gotas ≈ 1 mL, pero varía entre 16 y 24 según el gotero (WMS 2024, tabla 7).
 - ▶ Un juego de medidas de volumen de cerámica o calabaza marcadas (una «taza» y una olla o cántaro cuya capacidad se ha contado en tazas). Con ellas se hacen las diluciones 1:100 sin instrumentos (N1).
 - ▶ Opcional (N4 recuperado): kit de cloro libre DPD con comparador de colores o tiras reactivas; jeringas de 1 y 10 mL; báscula de cocina para el HTH.
- **Tiempo y personas:** una persona. Preparar la solución madre: 15-30 min cada 2-7 días (ver B.2 y C.5). Dosificar un bidón: 2 min. Tiempo de contacto: de 30 min (agua templada y clara) a 4 h (agua a 5 °C con dosis baja).

Principio de funcionamiento

Cómo mata el cloro y qué variables importan

El hipoclorito sódico (lejía) y el cálcico (HTH) se disuelven en agua y forman **ácido hipocloroso (HOCl)** e ion hipoclorito (OCl^-). Ambos oxidan enzimas, membranas y ácidos nucleicos de los microorganismos. Juntos se miden como **cloro libre**. La desinfección depende del producto **C·t** (concentración de cloro libre en mg/L por tiempo de contacto en minutos): se puede usar menos cloro esperando más, o más cloro esperando menos. Cuatro factores lo modifican:

1. **Tipo de microorganismo.** Para una reducción del 99,9 % (WMS 2024, tabla 4): *E. coli*, C·t $\approx$ 0,016 mg·min/L (segundos); virus entéricos, C·t $\approx$ 0,5-30; quistes de *Giardia*, C·t $\approx$ 77-153 según temperatura y pH (los quistes de amebas, $\approx$ 35); ooquistes de *Cryptosporidium*, C·t $\approx$ 10 400-15 300 (20 mg/L durante 8-13 h: **impracticable** en agua de bebida).
2. **Temperatura.** El frío ralentiza la reacción. Regla de campo de Oxfam: 30 min a 25 °C y **doble tiempo por cada 10 °C menos**. Esta regla da tiempos más cortos que la tabla 2 (a 5 °C, 120 min frente a 180 min con 4 mg/L): **si no coinciden, manda la tabla 2**, que es la más conservadora.
3. **pH.** El HOCl es mucho más eficaz que el OCl^- (decenas de veces), y la proporción de HOCl cae al subir el pH: 92 % a pH 6,5, 52 % a pH 7,5 y 26 % a pH 8 (a 25 °C, con pKa 7,54); a pH 9 apenas queda un 3 % (mismo cálculo). Por eso la OMS exige pH < 8 para dar por buenos los residuales estándar. Regla práctica en aguas alcalinas: **si se acerca a pH 8, doble tiempo de contacto; entre 8 y 9, sube también el residual a $\geq$ 0,4-0,6 mg/L y alarga el contacto; por encima de 9 la cloración no es fiable** (Oxfam pide $\geq$ 0,4 mg/L con pH > 8; el límite de pH 9 se deduce del 3 % de HOCl calculado arriba). En N1 no se mide el pH: en aguas que se sabe que son muy calizas (dejan mucha costra blanca en las ollas), aplica directamente doble dosis y doble tiempo.
4. **Demanda de cloro y turbidez.** La materia orgánica, el amonio, el hierro, el manganeso y las partículas **consumen** cloro antes de que actúe, y las partículas protegen a los microbios en su interior. La parte que queda tras cubrir esa demanda es el **cloro residual libre**: es el que desinfecta y el que se mide. Por encima de 10 NTU la cloración pierde eficacia y exige doble dosis; por encima de 100 NTU hay que clarificar antes (Oxfam). Prueba sin turbidímetro: **dosis simple** solo si en un vaso transparente, a contraluz, no se aprecia ninguna turbidez (una persona empieza a ver turbidez hacia 5 NTU, WMS 2024; es decir, menos de unos 5-10 NTU). Si se ve algo turbia pero se lee un texto impreso a través de 10 cm de agua, **doble dosis** (menos de unos 30 NTU, el criterio de la desinfección solar). Si no se lee, **clarificar antes**.

Dosis objetivo

- **Agua clara de origen dudoso (superficial, pozo abierto):** 3-4 mg/L de cloro (WMS 2024, tabla 5). Las instrucciones de CDC/EPA (2 gotas de lejía al 5-9 % por litro) dan en la práctica unos 5-9 mg/L.
- **Agua de buena calidad (pozo protegido, red de dudosa fiabilidad):** 2 mg/L. El Safe Water System de CDC/OMS usa 1,875 mg/L para agua de menos de 10 NTU y 3,75 mg/L para 10-100 NTU (Lantagne et al. 2018).
- **Agua turbia, con color o muy fría:** doble dosis, 4-8 mg/L (CDC: agua «cloudy, murky, colored, or very cold»; WMS 2024, tabla 5). La EPA ya no pide doble dosis para el agua turbia: solo decantar y filtrar antes.
- **Techo:** la OMS fija 5 mg/L como valor guía de cloro para consumo de toda la vida; la mayoría de las personas nota el sabor bastante antes (a partir de unos 3 mg/L, WMS 2024). Superarlo puntualmente en emergencia no es peligroso («el cloro no tiene toxicidad conocida a las concentraciones usadas en desinfección», WMS 2024), pero hace el agua desagradable y la gente la rechaza, que es un riesgo sanitario real.

Cloro residual libre objetivo

Momento	Cloro libre	Fuente
Tras $\geq$ 30 min de contacto (pH < 8)	$\geq$ 0,5 mg/L	OMS
En el punto de consumo	$\geq$ 0,2 mg/L ($\geq$ 0,4 mg/L si pH > 8)	OMS, Oxfam
Máximo razonable al consumir	$\leq$ 2 mg/L por sabor; nunca > 4-5 mg/L	Lantagne 2018, Oxfam

Por qué la lejía pierde fuerza y el HTH no tanto

El hipoclorito sódico en disolución se descompone de forma continua en cloruro y clorato. La velocidad **aumenta con la temperatura, con la concentración, con la luz y con los iones metálicos**: una disolución al 15 % se descompone unas 10 veces más rápido que una al 5 %, y a 45 °C unas 5 veces más rápido que a 25 °C (Solenis). Con calor, la lejía doméstica pierde fuerza en meses: si es vieja o ha estado al sol, comprueba el residual o, sin kit,

dobra la dosis cuando el olor a cloro de la lejía sea débil. La EPA recomienda usar lejía guardada a temperatura ambiente **menos de un año**. El hipoclorito cálcico sólido y seco es mucho más estable: 3-5 años cerrado, fresco y seco (Oxfam). Consecuencias prácticas: comprueba el residual (o al menos el olor) cuando la lejía sea vieja, y prepara las soluciones madre diluidas con frecuencia.

Cómo actúa el yodo y por qué es solo para emergencias

El yodo elemental (I_2) y el ácido hipoyodoso (HOI) oxidan los microorganismos como el cloro. Ventajas: le afecta menos el pH, reacciona menos con la materia orgánica nitrogenada y funciona algo mejor en agua de peor calidad (OMS 2018). Inconvenientes: hacen falta dosis más altas (4-8 mg/L), **es ineficaz contra *Cryptosporidium*** y, sobre todo, es fisiológicamente activo: la glándula tiroides lo concentra. Beber 3 L diarios con un residual de 2-4 mg/L supone 6-12 mg de yodo al día; con las dosis de 4-8 mg/L de la tabla 4, 12-24 mg/día (WMS 2024 calcula 16-32 mg/día con comprimidos). Es muchas veces más que la ingesta recomendada de 0,15 mg/día para un adulto y que el límite superior tolerable de 0,6-1,1 mg/día (OMS 2018; WMS 2024). Por eso la OMS lo recomienda solo para uso de emergencia a corto plazo; la WMS 2024 lo limita a «periodos cortos (meses)» y pide revisar la tiroides a quien lo vaya a usar mucho tiempo, y el CDC desaconseja beber agua yodada más de unas pocas semanas. Este artículo adopta el límite prudente de **3 semanas-1 mes**, sabiendo que ningún plazo tiene una base experimental firme (Backer y Hollowell, 2000). La tintura y el Lugol llevan además yoduro, que no desinfecta pero sí suma yodo al organismo. Las soluciones de yodo incoloras (solo yoduro) **no sirven**.

Procedimiento

A. Cloración de un bidón con lejía (20-25 L, uso familiar)

1. **Clarificar.** Si el agua está turbia, déjala reposar 30-60 min y trasvasa la parte clara sin remover el poso, o filtrala por un paño de algodón doblado 4-8 veces. *Criterio de éxito:* en un vaso transparente, a contraluz, no se aprecia ninguna turbidez (menos de unos 5-10 NTU, WMS 2024): dosis simple en el paso 4. Si se ve algo turbia pero se lee un texto impreso a través de 10 cm de agua (menos de unos 30 NTU), doble dosis. Si no se lee, no clorar todavía: clarificar más o hervir.
2. **Identificar la concentración de la lejía.** Lee la etiqueta. Si viene en g/L de cloro activo, divide entre 10 para tenerla en %: 40 g/L = 4 %. Si viene en % de hipoclorito sódico, úsalo tal cual (el error de esta aproximación es menor del 15 %, muy inferior al margen de dosis). *Criterio de éxito:* tienes una cifra C en % y has confirmado que no lleva perfume, detergente ni «oxígeno activo». Si la etiqueta de una lejía apta para agua de bebida trae su propia dosis (gotas por litro), síguela y contrástala con la tabla 1: si difieren mucho, relee la concentración. Si no hay etiqueta, asume 3 % y comprueba el residual (paso 7).
3. **Medir el volumen del recipiente.** Cuenta cuántas medidas conocidas (una botella de 1,5 L, un cazo marcado) caben hasta la señal de llenado. *Criterio de éxito:* volumen V conocido con ± 10 % y marcado con una raya en el recipiente para no repetir la medición.
4. **Calcular y añadir la dosis.** Usa la tabla 1 o la fórmula $\text{mL de lejía} = V \text{ (L)} \times \text{dosis (mg/L)} \div (C \text{ (\%)} \times 10)$. Dosis 4 mg/L para agua clara a 10 °C o más; 8 mg/L para agua turbia, con color o a menos de 10 °C. Echa la lejía **sobre el agua** (no en el recipiente vacío), con cuentagotas calibrado o jeringa. *Criterio de éxito:* dosis añadida anotada o recordada; el agua recién dosificada huele claramente a cloro al acercar la nariz a la boca del recipiente.
5. **Mezclar.** Tapa y agita o remueve con una varilla limpia 30 s; si el recipiente tiene grifo o tapón, deja salir un poco de agua por él para que también se desinfecte la rosca. *Criterio de éxito:* 30 s de mezcla y rosca o grifo mojados con agua clorada.
6. **Esperar el tiempo de contacto** según la tabla 2, tapado y a la sombra. Si la temperatura del agua cae entre dos columnas, usa la columna de temperatura **inferior** más próxima (agua a 12 °C con 4 mg/L: columna de 5 °C, 180 min). Mínimo absoluto: 30 min. *Criterio de éxito:* tiempo cronometrado (reloj, o una vela o marca de sombra calibradas) cumplido.
7. **Comprobar el residual.**
 - Con kit DPD: ver «Verificación». Objetivo 0,5-2 mg/L de cloro libre.
 - Sin kit (*criterio mínimo, EPA*): el agua debe tener **un olor ligero a cloro**. Si no huele nada, repite la misma dosis, espera **15 min más** y vuelve a oler. Si sigue sin oler tras la segunda dosis, el agua tiene mucha demanda (materia orgánica, hierro): clarifícala mejor o hiérvela. *Criterio de éxito:* olor ligero a cloro perceptible (o lectura DPD en rango).

8. **Servir y guardar** sin meter manos ni cazos, en el mismo recipiente tapado. *Criterio de éxito:* el agua sigue oliendo levemente a cloro 24 h después; si ya no, se consume ese día o se vuelve a clorar a media dosis.

Tabla 1. Dosis de lejía según su concentración (1 gota = 0,05 mL; cloro en g/L $\approx$ C % $\times$ 10)

Lejía	mg de cloro por gota	Gotas por litro, agua clara (dosis resultante)	Gotas por litro, turbia o fría	mL por 20 L, clara (4 mg/L)	mL por 20 L, turbia (8 mg/L)	mL por 1000 L, clara (4 mg/L)
1 % (o solución madre de HTH al 1 %)	0,5	8 (4,0 mg/L)	16 (8,0 mg/L)	8,0	16,0	400
3 %	1,5	3 (4,5 mg/L)	5 (7,5 mg/L)	2,7	5,3	133
5 %	2,5	2 (5,0 mg/L)	3 (7,5 mg/L)	1,6	3,2	80
6 %	3,0	2 (6,0 mg/L)	3 (9,0 mg/L)	1,3	2,7	67
8,25 %	4,1	1 (4,1 mg/L)	2 (8,3 mg/L)	1,0	1,9	48

Comparación con la regla simplificada del CDC: **2 gotas por litro** de lejía al 5-9 % en agua clara y **4 gotas** en agua turbia, con color o muy fría; con lejía al 1 %, 10 gotas por litro. La EPA da también 2 gotas por litro de lejía al 6 % o al 8,25 %, pero para agua turbia solo pide decantarla y filtrarla antes. Esa regla es válida y fácil de recordar, pero con lejía al 8,25 % en agua turbia da unos 16 mg/L: segura a corto plazo, de sabor muy fuerte. Para volúmenes de 1-2 L las gotas son imprecisas: si puedes, trata al menos 5-10 L de una vez.

Ejemplo resuelto. Lejía con etiqueta «40 g/L de cloro activo» (C = 4 %). Bidón de 25 L con agua de río clarificada, a 8 °C. Por ser fría: dosis 8 mg/L. $\text{mL} = 25 \times 8 \div (4 \times 10) = 200 \div 40 = 5 \text{ mL}$ $\rightarrow$ una cucharadita rasa de 5 mL, o 100 gotas. Tiempo de contacto (tabla 2, columna 5 °C, 8 mg/L): 60 min. Tras 60 min debe oler ligeramente a cloro.

Tabla 2. Tiempo de contacto mínimo recomendado en campo, cloro o yodo (WMS 2024, tabla 6; calculado para quistes de *Giardia*, muy por encima de lo que necesitan bacterias y virus)

Concentración de halógeno	5 °C	15 °C	30 °C
2 mg/L	240 min	180 min	60 min
4 mg/L	180 min	60 min	45 min
8 mg/L	60 min	30 min	15 min

Regla práctica: agua templada y clara con 4-5 mg/L, 30 min es el mínimo de CDC/EPA y basta para bacterias y virus; si preocupa *Giardia* (agua de montaña, ganado aguas arriba) o el agua está fría, usa la tabla. En aguas alcalinas aplica la regla del pH del apartado «Principio de funcionamiento» (cerca de pH 8, doble tiempo; entre 8 y 9, más residual y más tiempo; por encima de 9, no fiarse del cloro); sin medir el pH, en aguas muy calizas conocidas, doble dosis y doble tiempo.

B. Solución madre sin instrumentos (dilución 1:100, nivel N1)

Sirve para dosificar muchos recipientes con medidas cerámicas en vez de gotas.

1. **Preparar la solución madre (~500 mg/L de cloro).** En un cántaro de cerámica esmaltada o vidrio, limpio, echa **1 medida de lejía** y las **medidas de agua clara** que indica la tabla 3. Remueve con una varilla de madera o vidrio. *Criterio de éxito:* olor a cloro intenso al destapar; líquido transparente.
2. **Etiquetar y guardar** tapado, a la sombra, en lugar fresco, fuera del alcance de los niños, con una marca visible (p. ej. una cruz grabada) que lo distinga de los cántaros de agua de beber. Prepara solución para pocos días: 2-4 en clima cálido, 7 como máximo en lugar fresco y a oscuras. Dosifica con ella solo si al destapar huele claramente a cloro; con kit DPD, comprueba el residual del agua tratada. *Criterio de éxito:* recipiente inconfundible, fecha de preparación conocida y olor claro a cloro antes de usarla.
3. **Dosificar: 1 medida de solución madre por cada 100 medidas de agua clara** ($\approx$ 5 mg/L), o **2 por cada 100** si el agua está turbia o fría ($\approx$ 10 mg/L). Ejemplo: 1 taza de 200 mL por cada 20 L. Mezcla, espera y comprueba como en A.5-A.8. *Criterio de éxito:* olor ligero a cloro tras el tiempo de contacto.

Tabla 3. Medidas de agua por cada medida de lejía para obtener ~500 mg/L

Lejía	Medidas de agua por 1 de lejía
3 %	60

Lejía	Medidas de agua por 1 de lejía
4 %	80
5 %	100
6 %	120
8,25 %	165

C. Hipoclorito cálcico granulado (HTH 65-70 %)

- Preparar la solución madre al 1 % (10 g/L de cloro).** Protegido con guantes y gafas, al aire libre, echa **14 g de HTH al 70 %** (≈ 2 cucharaditas colmadas: la EPA da ≈ 7 g, $\frac{1}{4}$ de onza, por cucharadita colmada; si tienes báscula, pézalo la primera vez, porque la densidad del granulado varía) **sobre 1 L de agua** en un recipiente de plástico o vidrio. **Siempre el producto sobre el agua, nunca el agua sobre el producto.** Remueve 1 min con varilla no metálica. *Criterio de éxito:* el granulado se ha disuelto salvo un poso blanco insoluble (normal: carbonato e hidróxido de calcio).
- Decantar.** Deja reposar 30-60 min y trasvasa el líquido claro a un frasco opaco con tapón que no sea metálico. *Criterio de éxito:* líquido transparente sin partículas; el poso se desecha diluido en mucha agua, lejos de fuentes y cultivos.
- Dosificar** como la lejía al 1 % de la tabla 1: 8 gotas/L (4 mg/L), 8 mL por 20 L, 400 mL por 1000 L. *Criterio de éxito:* el mismo de A.7.
- Alternativa sin báscula (EPA):** 1 cucharadita colmada (≈ 7 g, $\frac{1}{4}$ de onza) de HTH en 2 galones ($\approx 7,6$ L) de agua da una solución madre que la EPA cifra en ≈ 500 mg/L (con HTH real del 65-70 % salen unos 600-650 mg/L); se dosifica a **1 parte por 100 partes de agua** (≈ 5 -6,5 mg/L). Ejemplo: 1 taza de 200 mL de solución por cada 20 L. *Criterio de éxito:* olor ligero a cloro tras 30 min.
- Conservación:** la solución madre al 1 % se degrada más rápido que el sólido. Prepara solución para 2-4 días (Oxfam); en frasco opaco y fresco puede aguantar más, pero entonces comprueba el residual del agua tratada o el olor a cloro de la solución en cada lote. El HTH sólido, bien cerrado, dura 3-5 años.

D. Depósitos, cisternas y aljibes

D.1. Calcular el volumen (OMS/WEDC, nota técnica 3):

- Rectangular: $V \text{ (L)} = \text{largo (m)} \times \text{ancho (m)} \times \text{altura de agua (m)} \times 1000$.
- Cilíndrico vertical: $V \text{ (L)} = 3,14 \times \text{diámetro}^2 \text{ (m}^2\text{)} \div 4 \times \text{altura de agua (m)} \times 1000$.

D.2. Clorar el agua almacenada (tratamiento ordinario).

- Calcula el volumen de agua (no el del depósito vacío). *Criterio de éxito:* cifra en litros.
- Dosis 4 mg/L (8 mg/L si está turbia o fría): $\text{g de cloro} = V \text{ (L)} \times \text{dosis (mg/L)} \div 1000$; con lejía, $\text{mL} = \text{g de cloro} \times 100 \div C \text{ (\%)}$; con HTH al 70 %, $\text{g de HTH} = \text{g de cloro} \div 0,7$. *Criterio de éxito:* cantidad calculada y revisada por una segunda persona.
- Disuelve primero el producto en un cubo de 10 L de agua del propio depósito (el HTH, además, decántalo) y viértelo repartido por la superficie o por la boca de entrada mientras se llena. *Criterio de éxito:* no quedan grumos en el fondo del cubo.
- Mezcla (removiendo con un palo largo, o recirculando con cubos 5-10 min) y espera según la tabla 2. *Criterio de éxito:* cloro libre 0,5-2 mg/L en una muestra tomada del grifo de salida.

Ejemplo resuelto. Aljibe rectangular de $2,0 \times 1,5$ m con 1,2 m de agua clara a 18°C . $V = 2,0 \times 1,5 \times 1,2 \times 1000 = 3600$ L. Cloro a 4 mg/L: $3600 \times 4 \div 1000 = 14,4$ g. Con lejía al 6 %: $14,4 \times 100 \div 6 = 240$ mL. Con HTH al 70 %: $14,4 \div 0,7 = 20,6$ g. Contacto: 60 min (tabla 2, 15°C , 4 mg/L).

D.3. Desinfección de choque de un depósito vacío (antes de estrenarlo, tras una contaminación o tras limpiarlo; OMS/WEDC nota técnica 3): 0. **Seguridad dentro del depósito** (OMS/WEDC nota técnica 3, recuadro 3.2): abre tapas y registros y ventila antes de entrar; guantes, botas y gafas; **nunca entres solo:** siempre otra persona fuera, junto a la boca, que te vea o te oiga. **No entres en aljibes o depósitos subterráneos** si huele a gas o a podrido, o si una vela encendida se apaga al bajarla con una cuerda: puede haber gases que asfixian sin avisar. *Criterio de éxito:* depósito ventilado, vela encendida al fondo, equipo puesto y ayudante en la boca.

- Vacía, rasca y friega las paredes con cepillo, agua y jabón; aclara hasta que no quede espuma. Usa solo depósitos que hayan contenido agua o líquidos alimentarios, **nunca** combustible, pesticidas o aguas residuales. *Criterio de éxito:* sin biopelícula resbaladiza al tacto ni restos en las esquinas.

2. Llena 1/4 de la capacidad con agua limpia y añade **80 g de HTH por cada 1000 L de capacidad total** (≈ 55 mg/L de cloro). No lo espolvorees: disuelve antes los gránulos en un cubo con 10 L de agua (producto sobre el agua), deja posar 5-10 min y vierte el líquido. Equivalente con lejía al 5 %: 1,1 L por cada 1000 L ($80 \text{ g} \times 0,7 = 56 \text{ g}$ de cloro; $56 \text{ g} \div 50 \text{ g/L} = 1,12 \text{ L}$); con lejía de 35-40 g/L, 1,4-1,6 L. *Criterio de éxito:* producto disuelto, sin grumos en el fondo del cubo, y repartido.
3. Termina de llenar, cierra y deja **24 h**. Si hay urgencia, **doble dosis (160 g/1000 L) y 8 h**. Si tiene bomba y mangueras, recircula el agua clorada por ellas 1 h. *Criterio de éxito:* tiempo cumplido y olor fuerte a cloro al abrir.
4. Vacía el agua de choque **lejos de viviendas, ríos y estanques** (mata peces y plantas), llena con agua potable, deja 30 min y vuelve a vaciar. *Criterio de éxito:* el agua de aclarado huele como mucho ligeramente a cloro; el depósito está listo.

E. Yodo (alternativa para emergencias cortas)

1. **Clarificar** como en A.1. *Criterio de éxito:* el mismo.
2. **Dosificar según el producto** (tabla 4). *Criterio de éxito:* el agua toma un tono amarillo pajizo muy tenue (con 4-8 mg/L).
3. **Esperar** según la tabla 2 (la misma que para el cloro): 30 min como mínimo en agua templada y clara (EPA); a 5 °C, 60 min con 8 mg/L o 180 min con 4 mg/L. *Criterio de éxito:* tiempo cumplido.
4. **Quitar el sabor (opcional), solo tras el tiempo de contacto:** una pizca pequeña de vitamina C en polvo por litro (WMS 2024). Por estequiometría basta muy poco: unos 20 mg para 8 mg/L de cloro y unos 6 mg para 8 mg/L de yodo; una pizca de sobra no hace daño. Convierte el yodo en yoduro y el cloro en cloruro, sin color ni sabor. **Quita sabor y color, no el yodo:** el cuerpo absorbe igual el yoduro, así que las contraindicaciones y el límite de semanas siguen igual. Bebe el agua ese mismo día porque ya no queda residual. *Criterio de éxito:* agua incolora y sin sabor medicinal.

Tabla 4. Dosis de yodo por litro (WMS 2024, tabla 7; OMS 2018, tabla 6)

Producto	Para 4 mg/L (agua clara y templada)	Para 8 mg/L (turbia o fría)
Tintura de yodo al 2 %	0,25 mL = 5 gotas	0,5 mL = 10 gotas
Povidona yodada al 10 %	0,4 mL = 8 gotas	0,8 mL = 16 gotas
Solución saturada de cristales de yodo	13 mL	26 mL
Solución de Lugol al 5 % (cálculo propio, sin recomendación publicada)	$\approx 0,08 \text{ mL} \approx 2$ gotas	$\approx 0,16 \text{ mL} \approx 3$ gotas
Comprimidos de hidropéryoduro de tetraglicina	$\frac{1}{2}$ comprimido	1 comprimido

La WMS cuenta 20 gotas por mL (varía de 16 a 24). La EPA da la regla simplificada: **5 gotas de tintura al 2 % por litro, 10 si el agua está turbia o con color**, y esperar al menos 30 min. La cifra del Lugol es un cálculo propio a partir de su contenido de yodo libre (50 mg/mL al 5 %), no una recomendación publicada: úsala solo si no hay otra cosa. **Cuidado con la riqueza:** en farmacias se vende mucho Lugol al 1-2 %, y con esas gotas la dosis quedaría 2,5-5 veces corta. Comprueba en la etiqueta que es al 5 % de yodo; si es al 2 %, usa las dosis de la tintura al 2 %; si no consta la riqueza, no lo uses. El Lugol al 5 % lleva además un 10 % de yoduro potásico, que aporta unos 76 mg/mL de yodo en forma de yoduro, 1,5 veces el yodo libre: no desinfecta, pero suma yodo al organismo.

Método de cristales (tipo Polar Pure).

1. Mete 4-8 g de cristales de yodo resublimado en un frasco de vidrio de 30-60 mL con tapa hermética; llénalo de agua, tapa y agita 30-60 s. Espera **1 h**. *Criterio de éxito:* líquido pardo-anaranjado sobre los cristales, que no se disuelven del todo.
2. Vierte en el agua a tratar solo el líquido (13 mL por litro de agua clara, 26 mL si está fría o turbia), **sin que caiga ningún cristal**. La solubilidad del yodo baja con el frío: recarga y agita el frasco a temperatura de bolsillo (unos 20-25 °C); si el frasco está frío (< 10 °C), usa el volumen doble. Rellena el frasco de agua para la siguiente vez. *Criterio de éxito:* ningún cristal en el agua de beber; frasco relleno. Los cristales aguantan cientos de rellenos antes de disolverse del todo (WMS 2024, tabla 7).
3. Espera según la tabla 2. *Criterio de éxito:* tiempo cumplido.

Verificación

- **Olor (criterio mínimo, sin medios):** tras el tiempo de contacto, el agua clorada debe tener un olor ligero a cloro (EPA). Ausencia de olor = residual insuficiente o nulo: redosifica (paso A.7). Olor fuerte que pica en la nariz =

sobredosis: deja reposar tapado unas horas o mezcla con agua ya tratada sin olor. El olfato es poco preciso y se acostumbra rápido: que huela otra persona que no haya manipulado la lejía.

- **Kit DPD de cloro libre (si lo hay):** llena la celda del comparador con 10 mL de agua tratada (o el volumen que indique el kit), añade una pastilla DPD n.º 1, tritúrala y mezcla. **Lee el color rosa enseguida** (en menos de 1 min) contra la escala. Rango bueno: 0,5-2 mg/L tras 30 min; $\geq 0,2$ mg/L en el momento de beber. Un agua con mucho cloro (> 10 mg/L) puede **decolorar** el reactivo y dar una lectura falsamente baja: si el color aparece y desaparece, diluye la muestra a la mitad con agua sin cloro (p. ej. agua hervida y enfriada) y multiplica la lectura por 2, según las instrucciones del kit.
- **Prueba de demanda en 4 cubos (aldea, con kit DPD; Oxfam):** 4 cubos de 10 L con agua de la fuente; dosis 1, 2, 3 y 4 mg/L (1, 2, 3 y 4 mL de solución al 1 %, o 0,2, 0,4, 0,6 y 0,8 mL de lejía al 5 %); tras 30 min mide el cloro libre en cada uno. La dosis correcta es la menor que deja $\geq 0,5$ mg/L a los 30 min. Repite si la fuente cambia (lluvias, estiaje).
- **Yodo con almidón (N1, orientativo):** hierve una patata troceada o un puñado de arroz en poco agua y guarda el caldo frío. Unas gotas de ese caldo en un poco de agua yodada dan color **azul-violeta** si hay yodo libre. Es una prueba orientativa: un resultado negativo (sin color) no prueba que no quede yodo.
- **Lo que no verifica ninguna de estas pruebas:** la ausencia de *Cryptosporidium*, de productos químicos o de metales. El residual demuestra que hubo desinfectante suficiente, no que el agua sea inocua en todo.

Errores frecuentes

Síntoma	Causa probable	Solución
El agua no huele a cloro tras 30 min	Lejía vieja o recalentada; agua con mucha materia orgánica o hierro	Repetir dosis y esperar 15 min (EPA); clarificar mejor; usar lejía más reciente o HTH
Diarrea en quien bebe agua «clorada»	Agua turbia sin clarificar; tiempo de contacto corto en agua fría; <i>Cryptosporidium</i> ; recontaminación	Clarificar; respetar la tabla 2; hervir o filtrar si hay criptosporidiosis en la zona; servir sin meter utensilios
Sabor y olor tan fuertes que la gente no bebe	Sobredosis (reglas de gotas con lejía muy concentrada)	Calcular por la tabla 1; usar dosis de 2 mg/L en aguas buenas con más tiempo; airear o vitamina C tras el contacto
Sabor a «pescado» o medicinal fuerte	Cloraminas o clorofenoles: cloro reaccionando con amonio o fenoles del agua o del recipiente	Clarificar; recipientes limpios sin restos químicos; carbón vegetal tras el contacto
Posos blancos en la solución de HTH	Residuo insoluble normal	Decantar y usar solo el líquido claro
El agua sabe a perfume o hace espuma	Lejía con aditivos	Desechar esa agua y usar lejía sin aditivos
Agua tratada con yodo sigue marrón intenso	Sobredosis o cristal de yodo caído en el agua	Retirar el cristal; no beber; volver a tratar agua nueva con la dosis de la tabla 4
El residual desaparece en horas en el depósito	Depósito sin tapa, al sol, con biopelícula	Tapar, sombrear, choque de limpieza (D.3)
Dosis muy distinta entre bidones	Cuentagotas sin calibrar o volumen de recipientes supuesto	Calibrar gotas por mL; medir y marcar el volumen de cada recipiente

Seguridad

- **Nunca mezclar lejía ni HTH con ácidos ni con amoníaco.**
 - ▶ Con **ácidos** (vinagre, sulfumán o ácido clorhídrico, desincrustantes, limpiadores de baño y de cal, zumo de limón concentrado) se libera **cloro gaseoso**: gas amarillo verdoso de olor sofocante.
 - ▶ Con **amoníaco** o productos amoniacales (limpiacristales, algunos limpiadores, orina acumulada) se liberan **cloraminas**.
 - ▶ Ambos gases queman ojos, garganta y pulmones; a concentración alta, en un espacio cerrado, pueden **matar** o causar un edema pulmonar que a veces aparece **horas después** de una exposición que parecía leve.
 - ▶ **Qué hacer:** salir inmediatamente al aire libre y ventilar desde fuera; quitarse la ropa impregnada; lavar ojos y piel con agua abundante 15 min; reposo semisentado; atención médica si hay tos persistente, dificultad para respirar, pitidos o dolor torácico, y vigilancia durante 24 h aunque mejore.
- **Hipoclorito cálcico (HTH): comburente y reactivo (ICSC 0638).**

- ▶ No arde, pero **aviva el fuego** de lo que tenga cerca. En contacto con aceite, grasa, gasoil, líquido de frenos, glicerina, azúcar, serrín, papel o trapos puede **iniciar un incendio o una explosión**. Reacciona violentamente con ácidos, amoníaco y aminas, y con muchos metales. Se descompone a partir de unos 100 °C y rápidamente por encima de 175 °C, liberando cloro y oxígeno.
- ▶ **Almacenamiento:** en su envase original bien cerrado y seco, en lugar fresco y ventilado, a la sombra, **separado de combustibles, ácidos, abonos, pintura y alimentos**, fuera del alcance de niños y nunca en la vivienda. No devolver al envase restos sacados ni usar cucharas húmedas o sucias (unas gotas de agua o de materia orgánica dentro del envase pueden provocar calentamiento y descomposición).
- ▶ **Nunca mezclar HTH con cloros estabilizados:** tricloroisocianúrico (pastillas y «multiacción» de piscina) ni dicloroisocianurato (NaDCC, granulado «rápido» y comprimidos de potabilizar). Juntos reaccionan violentamente: calor, incendio o explosión y gases tóxicos. Ni en el mismo cubo, ni en el mismo dosificador, ni con la misma cuchara, ni en la misma estantería. Al recuperar existencias de piscinas, lee cada etiqueta y separa los envases; un bote sin etiqueta no se usa ni se mezcla con nada.
- ▶ **Manipulación:** guantes, gafas, al aire libre, **producto sobre el agua**, nunca agua sobre el producto.
- ▶ **Derrame:** recoger en seco con pala limpia en un recipiente limpio y seco aparte, y diluir los restos con mucha agua; no barrer con serrín ni trapos.
- ▶ **Incendio con HTH implicado** (ICSC 0638): agua en grandes cantidades, desde lejos; **no usar polvo** (extintores químicos secos); enfriar con agua los envases expuestos. No intentar sofocarlo tapándolo con mantas o tierra: el HTH aporta su propio oxígeno y sigue ardiendo.
- **Ingestión accidental de lejía o de solución concentrada.** La lejía doméstica diluida ($\leq 5-6\%$) suele producir irritación de boca, garganta y estómago, vómitos y dolor; la lejía concentrada, la solución madre de HTH o los gránulos pueden causar **quemaduras corrosivas** del esófago y el estómago, shock y muerte.
 - ▶ **Qué hacer:** enjuagar la boca; **no provocar el vómito**; no dar vinagre, bicarbonato ni «neutralizantes». Solo si la persona está consciente, traga sin dificultad y no vomita ni babea: un vaso de agua a sorbos (≈ 200 mL en un adulto; en niños, unos sorbos, $\approx 50-100$ mL) (ICSC 0638: «enjuagar la boca y dar a beber uno o dos vasos de agua»; el Servicio de Información Toxicológica desaconseja dar líquidos sin valoración médica, por eso la cantidad se limita). Si hay babeo, dificultad para tragar o vómitos, **nada por boca**. Buscar atención médica urgente, más si hay babeo, dificultad para tragar, dolor en el pecho, vómitos con sangre o dificultad respiratoria.
- **Ojos y piel:** la lejía y la solución de HTH causan quemaduras químicas, y en los ojos pueden dejar lesiones permanentes. Lavar con agua abundante 15 min, retirando lentillas; atención médica si persisten el dolor, el enrojecimiento o la visión borrosa.
- **Confusión de recipientes:** la causa más común de intoxicación grave es beber de una botella de agua o refresco rellena de lejía o solución madre. **Nunca** guardar soluciones de cloro en envases de bebida; marcar los cántaros de solución madre de forma inconfundible y ponerlos fuera del alcance de niños.
- **Yodo: contraindicaciones.** No usar para agua de beber en: **embarazo** (riesgo de bocio e hipotiroidismo en el recién nacido); enfermedad tiroidea actual o pasada, aunque esté controlada; antecedentes familiares fuertes de enfermedad tiroidea; **alergia o hipersensibilidad al yodo**; personas de zonas con déficit crónico de yodo (WMS 2024; CDC). Como precaución adicional de este artículo (no figura en esas guías), tampoco en **lactancia** ni para lactantes: el yodo pasa a la leche. Nadie debería beber agua yodada **más de unas pocas semanas seguidas** (CDC); límite prudente de este artículo, 3 semanas-1 mes; la WMS 2024 habla de «meses» y pide revisar la tiroides si el uso va a ser prolongado. Signos de exceso a vigilar: bultos en el cuello, cansancio y frío anormales, palpitaciones o nerviosismo: suspender el yodo y pasar a cloro, hervido o filtración.
- **Cristales de yodo:** tóxicos y corrosivos si se tragan; un solo cristal ingerido es una intoxicación, no una dosis. Frasco de vidrio bien cerrado, fuera del alcance de niños, y cuidado al decantar.
- **Subproductos de la desinfección (contexto de riesgo).** El cloro reacciona con la materia orgánica natural del agua y forma trihalometanos (como el cloroformo) y otros compuestos; las soluciones de hipoclorito viejas o calientes acumulan clorato. La OMS fija valores guía (cloroformo 0,3 mg/L; clorato 0,7 mg/L, provisional) calculados para consumo **durante toda una vida**, y su riesgo es pequeño frente al de beber agua sin desinfectar, que puede matar en días por cólera o disentería. La OMS insiste en que la desinfección **no debe comprometerse** por controlar subproductos. Para reducirlos sin perder eficacia: clarificar antes de clorar (quita materia orgánica), no sobredosificar y usar lejía y soluciones madre recientes y guardadas en fresco.
- **Lo que este método no resuelve:** *Cryptosporidium* (brotes de diarrea acuosa persistente pese a clorar: hervir o filtrar), agua con sospecha de combustible, pesticidas, metales o residuos industriales (no beber: buscar otra fuente).

- **Fuera de alcance:** la producción de cloro gaseoso y su uso en plantas potabilizadoras no se documentan aquí por su peligrosidad. La fabricación de hipoclorito por electrólisis de salmuera corresponde a un artículo de química.

Variantes

• Con menos recursos:

- ▶ *Sin cuentagotas ni jeringas:* método B (diluciones 1:100 con medidas cerámicas). Se pierde precisión ($\pm 30\%$), suficiente dado el margen entre 2 y 8 mg/L.
- ▶ *Sin reactivo:* no hay sustituto químico equivalente de fabricación sencilla (WMS 2024). El agua oxigenada al 3 %, el zumo de cítricos o la plata **no** sirven como desinfectante principal. Hay que pasar a hervido (p. 3), desinfección solar o filtración.
- ▶ *Cal clorada u «hipoclorito de cal» antiguo* (polvo blanqueador con $\approx 25\text{--}35\%$ de cloro disponible cuando es fresco): se usa como el HTH, recalculando con su riqueza y decantando. Se degrada deprisa: compruébalo por el residual o el olor y ajusta la dosis.

• Con más recursos:

- ▶ *Comprimidos de dicloroisocianurato sódico* (NaDCC, p. ej. Aquatabs): dosis exacta, estables años, ligeros; seguir la dosis del envase. Guardarlos lejos del HTH y no mezclarlos nunca con él (ver «Seguridad»).
- ▶ *Dióxido de cloro* en comprimidos o dos componentes: sí actúa sobre *Cryptosporidium*, pero necesita 2-4 h y no deja residual duradero (WMS 2024).
- ▶ *Kit DPD y medidor de pH:* permite bajar la dosis a lo justo (mejor sabor, menos subproductos) y comprobar cada lote.
- ▶ *Filtración previa* (cerámica, arena lenta) seguida de cloración: combinación de referencia, porque el filtro quita turbidez y parásitos resistentes y el cloro aporta residual.
- ▶ *Fabricación local de hipoclorito por electrólisis de salmuera* (sal, agua y corriente continua): da independencia de las existencias recuperadas; se tratará en un artículo de química.

• Escalado:

- ▶ *Familia:* bidones de 20-25 L con grifo, lejía o solución madre, olor como control.
- ▶ *Aldea:* cloración por lotes en un depósito comunitario (1-10 m³) o **dispensadores de cloro junto a la fuente** (un depósito de solución al 1 % con válvula que suelta una dosis fija por cubo). Hace falta una persona responsable, prueba de demanda en 4 cubos al cambiar la estación, kit DPD, registro de dosis y residual, y reserva de HTH. Clarificar antes si las fuentes son superficiales.
- ▶ *Ciudad:* dosificación continua con bombas o hipocloradores proporcionales al caudal, depósito de contacto dimensionado por C·t, control de turbidez (idealmente < 1 NTU) y pH, residual de 0,2-0,5 mg/L en los grifos, análisis microbiológico periódico y operadores formados. El cloro gaseoso lo usan grandes plantas industriales con normativa específica, fuera del alcance de este artículo.

Fuentes

- CDC. «How to Make Water Safe in an Emergency». Water, Sanitation, and Hygiene (WASH)-related Emergencies and Outbreaks. <https://www.cdc.gov/water-emergency/about/index.html>
- US EPA. «Emergency Disinfection of Drinking Water». <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/emergency-disinfection-drinking-water>
- Backer, H.D., Derlet, R.W. y Hill, V.R. (2024). «Wilderness Medical Society Clinical Practice Guidelines for Water Disinfection for Wilderness, International Travel, and Austere Situations: 2024 Update». *Wilderness & Environmental Medicine*, 35(1 Suppl), 45S-66S. doi:10.1177/10806032231218722. Manuscrito en <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/153527> (tabla 4, C·t; tabla 5, factores; tabla 6, tiempos de contacto; tabla 7, dosis de yodo y cloro; apartados sobre clarificación, toxicidad del yodo y mejora del sabor). Sustituye a la edición de 2019 (30(4S), S100-S120).
- Backer, H. y Hollowell, J. (2000). «Use of iodine for water disinfection: iodine toxicity and maximum recommended dose». *Environmental Health Perspectives*, 108(8), 679-684.
- OMS (2018). *Alternative drinking-water disinfectants: bromine, iodine and silver* (sección «Iodine as a drinking-water disinfectant»), apartados 2.2 y 3.2 y tabla 6.
- OMS. *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4.^a ed. con addenda: cloro (valor guía 5 mg/L; residual $\geq 0,5$ mg/L tras 30 min a pH < 8), trihalometanos y clorato.
- OMS/WEDC (2013). *Technical Notes on Drinking-Water, Sanitation and Hygiene in Emergencies*, n.º 3: «Cleaning and disinfecting water storage tanks and tankers».

- Lantagne, D. et al. (2018). «Sodium hypochlorite dosage for household and emergency water treatment: updated recommendations». *Journal of Water and Health*, 16(1), 112-125.
- Oxfam WASH. «Chlorination in Emergencies». <https://www.oxfamwash.org/chlorination-in-emergencies/>
- OIT/OMS. Ficha Internacional de Seguridad Química ICSC 0638: Hipoclorito de calcio (incendio, derrames, primeros auxilios).
- Instituto Nacional de Toxicología y Ciencias Forenses (España). Servicio de Información Toxicológica: recomendaciones ante la ingestión de productos cáusticos.
- Solenis. «The Stability of Chlorine Bleach (Sodium Hypochlorite) Solutions» (descomposición según temperatura y concentración).

Relacionados: Hervido del agua (p. 3) Desinfección solar (SODIS) (p. 9) Filtro lento de arena y biofiltro de carbón (p. 28) Filtros de cerámica y carbón (p. 38)

AGUA Y SANEAMIENTO › POTABILIZACIÓN

Filtro lento de arena y biofiltro de carbón

Filtro lento de arena doméstico (biosand) y comunitario, con capa biológica, dimensionado y limpieza; lecho de carbón vegetal granular.

N1 · Cerámica y agricultura · Borrador · civilizationrebuild.org/es/01-agua-y-saneamiento/potabilizacion/filtro-lento-de-arena-y-biofiltro-de-carbon/

Borrador sin revisión técnica. Puede contener errores: contrasta cifras y procedimientos antes de aplicarlos. Contiene 5 datos marcados como «verificar».

Resumen

Un filtro lento de arena hace pasar agua a muy baja velocidad (del orden de 0,1 m/h) por un lecho de arena fina de 0,5 a 0,9 m. En la superficie crece una capa biológica (*schmutzdecke*) que atrapa y digiere la mayoría de las bacterias, protozoos y helmintos y deja el agua transparente (turbidez inferior a 1 NTU). Aquí se explica la versión doméstica de flujo intermitente (tipo *biosand*, 24 a 72 L/día por filtro) y la comunitaria de flujo continuo (1 m² de lecho da unos 2400 L/día). Detrás de la arena puede ir un lecho de carbón vegetal granular que mejora el sabor, el olor y el color y retiene parte de los contaminantes orgánicos. **Ninguno de los dos sustituye la desinfección final:** el agua filtrada se hierve, se clora o se expone al sol antes de beberla.

Requisitos previos

- **Conocimientos:** medir volúmenes y tiempos con un recipiente graduado y contando segundos; desinfectar el agua filtrada (ver Hervido del agua (p. 3) y los artículos relacionados de desinfección química y solar). Hacer carbón vegetal: aún no hay artículo; el apartado F da un método mínimo.
- **Materiales (filtro doméstico):**
 - ▶ 1 recipiente estanco de 90 a 100 cm de alto y 25 a 35 cm de diámetro interior: tinaja de barro cocido sin vidriar o con vidriado sin plomo, tonel de madera, cubo de hormigón o de plástico alimentario.
 - ▶ Arena: unos 40 L ya cribada y lavada (parte de 60 a 80 L en bruto: el lavado y el cribado retiran parte).
 - ▶ Grava de separación (0,7 a 6 mm): unos 4 L. Grava de drenaje (6 a 12 mm): unos 4 L.
 - ▶ 1 tubo de salida de 1 a 2 cm de diámetro interior: caña de bambú o carrizo sin nudos interiores, tubo de barro cocido, cobre o plástico.
 - ▶ Sellador para el paso del tubo: arcilla con resina o cera de abeja (N1), mortero de cal (N2) o cemento (N3).
 - ▶ 1 difusor: tabla fina, plato de barro cocido o chapa, con agujeros de unos 3 mm.
 - ▶ 1 tapa y 1 recipiente limpio con tapa para recoger el agua filtrada.
- **Materiales (biofiltro de carbón doméstico):** 25 a 30 L de carbón vegetal de madera dura ya triturado, cribado y lavado; 1 recipiente de 35 a 40 L con el mismo tipo de tubo de salida elevado.
- **Herramientas:** cubos de 10 a 20 L (N1), cribas de tejido o cestería (N1), mortero o piedras para triturar (N0), regla o cuerda con nudos cada 1 cm (N1), conteo de segundos (N0). Para la versión comunitaria: azada y pala (N1), arcilla (N1) o mampostería (N2), compuerta o tapón de madera (N1).
- **Tiempo y personas:** filtro doméstico, 2 personas durante 1 a 2 días (sobre todo cribar y lavar la arena), más 2 a 4 semanas de maduración. Filtro comunitario de 2 m², 6 a 10 personas durante 1 a 3 semanas según el terreno, más la maduración.

Principio de funcionamiento

Qué retiene la arena. El agua atraviesa los huecos entre granos (en arena fina, de unas décimas de milímetro). Las partículas se quedan por tamizado en la superficie, por sedimentación dentro de los poros y por adherencia a los granos. Eso retiene turbidez, huevos de helmintos y quistes de protozoos, pero deja pasar muchas bacterias y casi todos los virus.

La capa biológica hace el trabajo fino. En los 1 a 2 cm superiores se forma en semanas una película pegajosa de algas, bacterias, protozoos y materia orgánica (*schmutzdecke*, «capa sucia» en alemán). Allí los patógenos quedan pegados, son devorados por protozoos o mueren por falta de alimento. Esa capa necesita:

1. **Tiempo de contacto:** la OMS/IRC recomienda diseñar a **0,1 m/h**, con un intervalo aceptado de **0,1 a 0,4 m/h** (Visscher et al. 1987; Global WASH Cluster). Más rápido, los patógenos atraviesan el lecho.
2. **Oxígeno:** llega disuelto en el agua o, en el filtro doméstico, por difusión a través de una lámina de agua de **5 cm** (CAWST 2009). Más agua encima ahoga la capa; menos, se seca con el calor.
3. **No secarse ni envenenarse:** si el lecho queda sin agua o se vierte agua clorada, la capa muere.

Tamaño de grano. El **tamaño efectivo** (d_{10}) es la abertura de criba por la que pasa el 10 % del peso; el **coeficiente de uniformidad** es $CU = d_{60}/d_{10}$. Para filtro lento: **$d_{10} = 0,15$ a $0,30$ mm** y **$CU < 5$, preferiblemente < 3** (Visscher et al. 1987; Pensilvania da 0,15 a 0,35 mm y CU 1,5 a 3). Arena más gruesa: el agua pasa demasiado rápido. Con muchos finos (limo, arcilla): se colmata en días. Muy poco uniforme: los granos finos rellenan los huecos de los gruesos y el caudal se hunde.

Por qué la salida sube por encima de la arena. El punto de vertido fija el nivel mínimo del agua dentro del filtro (vasos comunicantes). Si está por encima de la arena, el lecho nunca se vacía y la capa nunca se seca. Pero si el tubo baja mucho por fuera puede **sifonar**: sigue tirando del agua por debajo de la cota del codo y deja la arena al aire. Es la pieza que más a menudo se hace mal.

Qué hace el carbón. El carbón vegetal tiene una enorme superficie interna de poros donde se **adsorben** moléculas orgánicas: las que dan sabor, olor y color, restos de plaguicidas y otros orgánicos. También **destruye el cloro libre**. Cuanto más alta la temperatura de carbonización y más fino el grano, más capacidad: el carbón de madera hecho a ≥ 850 °C en gasificador funcionó bien, aunque el carbón activado comercial lo superó por un factor de 2 a 34 (media 15) (Kearns et al. 2021).

Contaminante	¿Lo retiene el lecho de carbón?
Sabor, olor, color	Sí, bien
Cloro libre residual	Sí (por eso se desinfecta después del carbón)
Plaguicidas y otros orgánicos	En parte; depende del carbón y se agota
Bacterias, virus, protozoos	No de forma fiable; pueden crecer bacterias dentro del lecho
Sales, nitratos, fluoruro, dureza	No
Metales (arsénico, plomo, etc.)	En general no , o muy poco
Turbidez	Poco, y se colmata: por eso va después de la arena

Orden del tren de tratamiento: (decantación si el agua es turbia) → arena → carbón → desinfección → almacenamiento tapado.

Qué esperar del filtro de arena madurado. Una reducción de 1 log es un 90 %, 2 log un 99 %, 3 log un 99,9 %.

Patógeno o parámetro	OMS 2011, tabla 7.7 (filtración lenta)	Comunitario (Global WASH Cluster)	Biosand (CAWST 2009)
Bacterias	0,2 a 2 log	> 95 %	hasta 96,5 % en laboratorio; 87,9 a 98,5 % en campo
Virus	0,25 a 4 log	> 95 %	70 a > 99 % en laboratorio
Protozoos	0,3 a > 5 log	> 99 %	> 99,9 % en laboratorio
Helmintos	—	—	hasta 100 % (supuesto por tamaño)
Turbidez de salida	—	< 1 NTU	95 % de reducción, hasta < 1 NTU

Los extremos bajos de la OMS corresponden a filtros mal operados (sin madurar, recién raspados, demasiado rápidos): la retención cae mucho. Incluso un 95 % deja pasar 50 bacterias de cada 1000: reduce mucho la diarrea, **no garantiza agua segura**. De ahí la desinfección final.

Límites de la entrada: turbidez recomendada hasta 10 NTU, con picos de hasta 50 NTU en el comunitario (Global WASH Cluster); el biosand admite hasta 50 NTU (CAWST 2009). Por encima, decanta antes.

Procedimiento

A. Dimensionar

- Calcula la demanda.** Si la capacidad es escasa, filtra solo el agua de beber y cocinar: **7,5 L por persona y día**. Si se filtra toda el agua doméstica, el acceso básico ronda los **20 L por persona y día** (Howard y Bartram 2003). *Criterio de éxito:* cifra de litros/día escrita.
- Elige el tipo.** Un biosand da 24 a 72 L/día en 4 tandas de 12 a 18 L (CAWST 2009).
 - Hasta ~70 L/día: **1 biosand** (a 7,5 L/persona/día, hasta 9 personas: $9 \times 7,5 = 67,5$ L).
 - Entre 70 y ~290 L/día: **2 a 4 biosand en paralelo**, uno por cada 70 L/día ($4 \times 72 = 288$ L).

- Más de ~300 L/día o uso colectivo: **filtro comunitario de flujo continuo**. *Criterio de éxito:* tipo y número de filtros decididos.
- Área del filtro comunitario.** Área (m²) = caudal (m³/h) / velocidad (m/h), a 0,1 m/h y 24 h/día. Así, 1 m² da 0,1 m³/h = 2400 L/día: 120 personas a 20 L/día o 320 a 7,5 L/día. **Ejemplo resuelto:** aldea de 200 personas a 20 L/día.
 - Demanda: $200 \times 20 = 4000 \text{ L/día} = 4 \text{ m}^3/\text{día} = 4 / 24 = 0,167 \text{ m}^3/\text{h}$. Área: $0,167 / 0,1 = 1,67 \text{ m}^2$.
 - 2 unidades iguales** para limpiar una sin cortar el suministro: $2 \times 0,9 \text{ m}^2$ ($0,95 \times 0,95 \text{ m}$). En marcha normal van a $0,167 / 1,8 = 0,093 \text{ m/h}$; con una parada, la otra va a $0,167 / 0,9 = 0,19 \text{ m/h}$, dentro de 0,1 a 0,4 m/h.
 - Caudal a medir: $167 \text{ L/h} = 2,8 \text{ L/min}$ en total, $1,4 \text{ L/min}$ por unidad: un cubo de 10 L en unos 7 min.
 - Solo para beber y cocinar (7,5 L): $1500 \text{ L/día} = 0,0625 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 0,63 \text{ m}^2 \rightarrow 2 \times 0,32 \text{ m}^2$ ($0,57 \times 0,57 \text{ m}$). Visscher et al. (1987) dan de 5 a 200 m² por unidad: las de 0,3 a 0,9 m² están por debajo de lo habitual. Funcionan, pero se raspan desde el borde, sin pisar dentro. *Criterio de éxito:* área, unidades y caudal por unidad anotados.
 - Caudal del filtro doméstico.** Carga máxima **600 L/h por m²** (CAWST 2009): caudal máximo (L/h) = área × 600. Recipiente de 30 cm: área = $3,14 \times 0,15^2 = 0,0707 \text{ m}^2$; máximo = $42 \text{ L/h} = 0,7 \text{ L/min}$. El filtro CAWST v10 trabaja a **0,4 L/min** como máximo con el depósito lleno. Como 0,7 L/min es 1,75 veces ese valor, **apunta a 0,4 a 0,5 L/min**. *Criterio de éxito:* caudal objetivo de tu recipiente anotado.
 - Alturas del filtro doméstico** (de abajo arriba; capas según CAWST 2012 y Global WASH Cluster):

Capa	Espesor	Material
Grava de drenaje (rodea la boca del tubo)	5 cm	6 a 12 mm
Grava de separación	5 cm	0,7 a 6 mm
Arena filtrante	45 a 50 cm	< 0,7 mm, sin finos
Lámina de agua en reposo	5 cm (4 a 6 cm)	—
Hueco hasta el difusor	lo justo para que no toque el agua (en el cálculo, 5 cm)	—
Depósito sobre el difusor	lo que ocupe una tanda de 12 L	—

Para 30 cm de diámetro, 12 L ocupan $12\,000 \text{ cm}^3 / 707 \text{ cm}^2 \approx 17 \text{ cm}$. Total $\approx 5 + 5 + 50 + 5 + 5 + 17 + 5 \text{ cm}$ de resguardo $\approx$ **92 cm**. *Criterio de éxito:* dibujo a escala con las cotas, incluida la del codo de salida = superficie de la arena + 5 cm.

- Comprueba el volumen de poros.** Cada tanda debe caber en los poros de la arena para quedarse dentro del lecho durante la pausa. Porosidad de la arena de sílice = $1 - \text{densidad aparente} / \text{densidad del grano} = 1 - 1560 / 2650 \approx 0,41$ (valores de Thames Water 2005). Volumen de poros = $0,0707 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ m} \times 0,41 = 0,0145 \text{ m}^3 = 14,5 \text{ L}$ $\geq 12 \text{ L}$. *Criterio de éxito:* tanda $\leq$ volumen de poros; si no, reduce la tanda.

B. Conseguir, cribar y lavar la arena y la grava

- Elige la fuente.** Por orden de preferencia (CAWST): **roca triturada**, arena de cantera seca y arena de río tomada alto en la orilla. La de río suele traer materia orgánica y patógenos de excrementos. Busca granos duros de cuarzo que no se deshagan al frotarlos. Evita la arena de playa (sal y conchas), la de junto a letrinas, basureras o escombreras de minas, y la arcillosa. *Criterio de éxito:* un puñado húmedo apretado no forma una bola que conserve la huella de los dedos (si la forma, lleva demasiada arcilla).
- Criba lo grueso** por una criba de unos **0,7 mm**. Sin tamices: tela, mosquitera o cestería de trama regular; abertura $\approx$ (10 mm / hilos por cm) – grosor del hilo (10 hilos/cm con hilo de 0,3 mm $\rightarrow$ 0,7 mm). También tabla fina o cuero perforados con alambre caliente de grosor conocido. Guarda lo retenido para las gravas. *Criterio de éxito:* lo cribado pasa la medición del paso 3 y, al final, la prueba de caudal (C.7).
- Mide el grano sin tamices.** Pon granos en fila, tocándose, a lo largo de 1 cm y cuéntalos: diámetro medio $\approx$ 10 mm / número de granos. Busca granos típicos de 0,2 a 0,5 mm (20 a 50 granos por cm), coherente con d10 = 0,15 a 0,30 mm y CU < 3. Hazlo con 3 muestras de sitios distintos del montón. *Criterio de éxito:* las 3 dan 20 a 50 granos/cm, sin dos poblaciones muy distintas (polvo más granos gordos).
- Quita los finos por decantación.** En agua a 20 °C un grano de cuarzo natural cae a unos **7,5 mm/s si mide 0,1 mm** y a unos **10 mm/s si mide 0,12 mm** (Ferguson y Church 2004). Regla práctica, válida para cualquier recipiente: **tras remover, espera 1 s por cada cm de agua que haya sobre la arena** (30 cm $\rightarrow$ 30 s) y vierte el agua turbia. Se va lo que cae a menos de 10 mm/s: granos de menos de unos 0,12 mm, por debajo del d10 buscado. En agua a 10 °C la viscosidad es un 30 % mayor y los granos caen más despacio: espera 36 a 40 s por cada 30 cm. Procedimiento: llena el recipiente con un tercio de arena y el resto de agua (Thames Water 2005);

mide con la cuerda de nudos la altura de agua sobre la arena; remueve con fuerza 10 s; espera según la regla; vierte sin arrastrar la arena del fondo; repite. *Criterio de éxito:* tras remover y esperar, el agua deja ver la arena del fondo y ya no arrastra polvo al verterla.

5. **Comprueba el limo sin lavar de más.** Prueba de la botella (Pyper y Logsdon 1991, en Thames Water 2005): 100 mL de arena en un frasco transparente, agua hasta 200 mL, agita fuerte y deja reposar 20 min. Se forman agua turbia, una banda de limo y la arena. $\text{Limo (\%)} = \text{altura del limo} / \text{altura de la arena} \times 100$; lava si pasa del 1 % (Visscher et al. 1987). En el biosand no laves más de lo necesario: arena demasiado limpia deja pasar el agua demasiado rápido, y la decisión final la da la prueba de caudal (C.7). *Criterio de éxito:* banda de limo apenas visible, ≤ 1 % de la altura de la arena.
6. **Prepara las gravas.** Criba lo retenido en el paso 2 en dos fracciones: **0,7 a 6 mm** (separación) y **6 a 12 mm** (drenaje), comprobando con la regla los granos mayores de cada montón. Lava ambas hasta que el agua salga clara. *Criterio de éxito:* agua de lavado transparente al primer vertido; ninguna piedra plana o alargada mayor de 12 mm.
7. **Guarda las fracciones** separadas y rotuladas, tapadas, sobre una superficie limpia. *Criterio de éxito:* 3 montones identificados, sin tierra, hojas ni excrementos de animales.

C. Construir el filtro doméstico (biosand, N1)

1. **Prepara el recipiente.** Barro cocido: llénalo de agua 24 h para ver si gotea. Madera: no tratada y no tóxica, déjala hinchar con agua 2 a 3 días hasta que deje de rezumar. *Criterio de éxito:* ninguna pérdida visible y nivel que no baja más de 1 cm en 24 h.
2. **Coloca el tubo de salida.** Dos formas:
 - **Interior (preferible):** tubo vertical dentro del recipiente, con la boca inferior a 1 a 2 cm del fondo, que sube pegado a la pared, la atraviesa en la cota «superficie de arena + 5 cm» y sale en codo.
 - **Exterior:** agujero cerca del fondo y tubo que sube por fuera hasta esa cota y luego sale. **Evita el sifón:** tras el codo, el pico debe caer poco (**5 cm como mucho**) o llevar un **agujero pequeño (2 a 3 mm) en lo alto del codo** que deje entrar aire. Sella el paso por la pared con arcilla con resina o cera (N1), mortero de cal (N2) o cemento (N3), por dentro y por fuera. Cubre la boca inferior con tela o rejilla para que no entre grava. *Criterio de éxito:* con el recipiente lleno de agua, el agua sale por el pico y deja de salir cuando el nivel interior llega exactamente a la cota del codo, sin bajar más en los 10 min siguientes; sin fugas por el sellado tras 12 h.
3. **Llena primero de agua y vierte los medios dentro del agua,** para no dejar bolsas de aire. Marca antes las cotas en la pared. Echa 10 a 15 cm de agua limpia, añade la grava de drenaje hasta 5 cm, nivela, y encima la de separación hasta 5 cm. *Criterio de éxito:* capas planas (± 1 cm) y agua siempre por encima.
4. **Añade la arena** a puñados dentro del agua, añadiendo agua según haga falta, hasta 45 a 50 cm. Nivela con la mano plana, sin apretar. *Criterio de éxito:* superficie plana a 5 cm (4 a 6 cm) bajo el codo.
5. **Coloca el difusor,** con agujeros de unos **3 mm** repartidos por toda su superficie, apoyado en un saliente, en cuñas o en la pared, **por encima de la lámina de agua en reposo** y sin tocarla. *Criterio de éxito:* al verter de golpe un cubo de 10 L, la arena no presenta cráter ni surcos.
6. **Pon la tapa** y, bajo el pico, el recipiente de recogida sobre un soporte, tapado alrededor con un paño limpio. *Criterio de éxito:* el chorro cae dentro sin salpicar ni tocar el borde.
7. **Prueba de caudal.** Llena el depósito con la tanda completa (12 L). En cuanto empiece a salir, mide el tiempo que tarda en llenarse un vaso de volumen conocido. $\text{Caudal (L/min)} = \text{volumen (L)} \times 60 / \text{segundos}$. Ejemplo: 1 L en 150 s $\rightarrow$ 0,4 L/min. *Criterio de éxito:* 0,4 a 0,5 L/min en un recipiente de 30 cm ($\leq 0,4$ en un CAWST v10), y no menos de la mitad de ese valor para que la familia no se canse de esperar.
 - **Demasiado rápido:** arena gruesa o demasiado lavada. Sustituye los 5 a 10 cm superiores por arena más fina o menos lavada y repite.
 - **Demasiado lento:** demasiados finos. Saca los 5 a 10 cm superiores, lávalos más (B.4) y repite.
8. **Comprueba la lámina de agua en reposo.** Cuando deje de salir agua, mide la altura del agua sobre la arena. *Criterio de éxito:* 5 cm (4 a 6 cm; CAWST 2009). Si no, corrige la altura de la arena (no la del tubo); si baja de 4 cm con la arena bien nivelada, el tubo sifona (ver Errores frecuentes).

D. Maduración y uso diario

1. **Usa el filtro todos los días** con la misma fuente de agua desde el primer día; cambiar de fuente baja el rendimiento (CAWST 2009). *Criterio de éxito:* registro diario de tandas (una raya por tanda).
2. **Madura la capa biológica:** hasta **30 días** en el biosand (CAWST 2009); en el comunitario, hasta **3 semanas** con arena nueva (Visscher et al. 1987), más en agua fría. Durante ese tiempo el agua sale clara pero **no está tratada:**

desinfectala siempre. *Criterio de éxito:* el caudal baja algo y se estabiliza, y sobre la arena aparece una película parda o verdosa algo viscosa al tacto.

3. **Respetar la pausa entre tandas: al menos 1 h** desde que deja de salir agua; lo recomendado son 6 a 12 h y como máximo 48 h (CAWST 2009). Pauta típica: 4 tandas al día. *Criterio de éxito:* nunca se rellena mientras aún gotea; nunca pasan más de 2 días sin una tanda.
4. **Pretrata el agua turbia.** Por encima de 50 NTU, cuela por un paño doblado o decanta (CAWST 2009). Sin turbidímetro, **prueba de la botella de CAWST (2009):** llena una botella de plástico transparente de 2 L con el agua y ponla sobre letras grandes impresas; si al mirar desde arriba a través de la botella se leen, probablemente está por debajo de 50 NTU. *Criterio de éxito:* las letras se leen; si no, decanta primero.
5. **Nunca eches agua clorada, jabón ni agua caliente:** matan la capa biológica. *Criterio de éxito:* el agua de entrada no huele a cloro.

E. Mantenimiento

Filtro doméstico: «remover y tirar» (*swirl and dump*, CAWST). Solo cuando el caudal ya no alcanza para la casa o baja de **0,1 L/min** (manual CAWST), no por calendario.

1. Si el filtro está vacío, echa unos **4 L** de agua (CAWST). Quita la tapa y el difusor. Lávate las manos.
2. Remueve en círculos con la palma, solo la superficie de la arena, sin hundir los dedos hacia la grava.
3. Saca el agua sucia con un vaso y tírala lejos de la fuente y del filtro. Repite hasta recuperar el caudal.
4. Nivelar la arena, vuelve a poner el difusor y la tapa. Limpia el pico **por fuera** con agua y jabón o agua clorada, sin que entre en el filtro. *Criterio de éxito:* el caudal vuelve a acercarse al de la prueba inicial. Durante unos días el filtro retiene peor mientras la capa se rehace (CAWST 2009): desinfecta como siempre.

Filtro comunitario: raspado

1. **Cuándo:** cuando, con la salida totalmente abierta, el caudal cae por debajo del de diseño o el agua llega al rebosadero. Va de varias semanas a un año según el agua (Global WASH Cluster).
2. **Vacía parcialmente:** cierra la entrada y baja el nivel hasta unos **10 cm por debajo de la superficie de la arena** (Global WASH Cluster). *Criterio de éxito:* la arena superior visible y húmeda, no seca.
3. **Raspa** con pala plana o tabla los **1 a 3 cm** superiores (Thames Water 2005), en franjas y de forma uniforme, retirándolos en cestos. En unidades de menos de unos 2 m² trabaja desde el borde; en las grandes, pisa solo sobre tablas. Hazlo en el día. *Criterio de éxito:* debajo aparece arena clara y uniforme.
4. **Rellena desde abajo** con agua **ya filtrada:** abre el tubo de unión con la unidad gemela (H.6) y deja que el agua suba por el dren. Si no hay agua filtrada, no uses agua decantada por abajo (siembra patógenos en el dren): llena por arriba, despacio, vertiendo sobre la piedra plana (Thames Water 2005). *Criterio de éxito:* el nivel sube pocos cm por minuto, sin burbujas ni cráteres, hasta cubrir la arena.
5. **Re-madura:** tras el raspado, cuenta con **al menos unos días**, y más tras recargar arena (Global WASH Cluster; Visscher et al. 1987 da 1 a 2 días tras raspar y hasta 3 semanas con arena nueva). Mientras, tira el agua o desinfectala. *Criterio de éxito:* turbidez de salida y caudal de nuevo en sus valores habituales.
6. **Lava y guarda la arena raspada** (B.4) en un montón cubierto.
7. **Recarga** cuando el lecho baje a **0,5 a 0,6 m** (Visscher et al. 1987; Global WASH Cluster), cada pocos años. **Técnica de zanjas** (Thames Water 2005, de Huisman y Wood 1974): retira la arena vieja hasta la grava en una franja, pon arena lavada abajo y la vieja encima, y sigue franja a franja. La arena vieja, ya colonizada, queda arriba y acorta la re-maduración. *Criterio de éxito:* lecho de nuevo a 0,8 a 0,9 m, plano, y caudal de diseño recuperado.

F. Preparar el carbón para el filtro

Sirve también para el cartucho de carbón de los filtros domésticos de cerámica.

1. **Madera.** Dura, densa y seca (encina, roble, haya, frutales o cáscara de coco). Nunca tratada, pintada, aglomerada ni barnizada. *Criterio de éxito:* leña sin corteza podrida que suena seca al golpearla.
2. **Carboniza.** El mejor carbón para agua sale de un **gasificador de tiro invertido** (TLUD, *top-lit updraft*, bidón de chapa, N2-N3): el hecho a **≥ 850 °C** adsorbió mucho mejor que el de baja temperatura (Kearns et al. 2021). Sin chapa, **método mínimo N1 en fosa o montículo** (FAO 1983, cap. 5 y 6):
 - Apila la leña apretada, rellenando huecos con palos finos, en una fosa o alrededor de un palo central. Cubre con hojas y **10 a 20 cm de tierra arenosa**; deja un hueco arriba y entradas de aire en la base (6 a 10 en un montículo de 4 m de diámetro).
 - Enciende echando brasas por el hueco superior. **Humo blanco y denso:** el fuego ha prendido. Tapa con tierra toda grieta por la que salga llama.

- Cuando el humo **disminuye y se vuelve azulado y luego casi transparente** (días, en un montículo de 4 m), la carbonización ha terminado y lo que arde ya es el carbón: **sella** con tierra o arcilla todas las entradas y el hueco superior.
- Deja enfriar sellado (2 a 3 días en ese montículo). Rendimiento de buena práctica: 1 kg de carbón por 4 kg de leña seca al aire. Este carbón se hace a menor temperatura (unos 550 °C en un montículo mejorado, según la FAO) y de forma desigual: **adsorbe menos que el de gasificador y quitará menos sabor y olor**. Aparta los trozos poco cocidos de junto a la salida del humo. *Criterio de éxito:* trozos negros por dentro, sin núcleo marrón, que suenan metálicos al chocar, tiznan poco y se parten con fractura brillante.
- 3. **Enfría sin aire.** Si apagas con agua, hazlo al aire libre y apartado del vapor (ver Seguridad). Extiende el carbón a la sombra. *Criterio de éxito:* al hundir la mano en el montón no se nota calor en ningún punto, y al día siguiente tampoco; solo entonces ensaca.
- 4. **Tritura.** Humedece el carbón para que no levante polvo y machácalo en mortero o entre piedras dentro de un saco. *Criterio de éxito:* casi todo en granos del tamaño de un guisante o menores.
- 5. **Criba.** Apunta a granos de **4 a 8 mm**. Kearns et al. (2021) modelan un adsorbedor a escala real (lecho de 58 cm de diámetro y 30 cm de fondo) con granos de **4,5 mm** y **2,5 h** de contacto; el sistema comunitario de Tailandia, en uso desde 2008, emplea granos de **7,5 mm** con unas **18 h** de contacto. El grano fino adsorbe más (pasar de 0,165 a 0,059 mm multiplicó la capacidad por 3,5 a 3,9 en laboratorio), pero se colmata y se pierde en el lavado. Tritura otra vez lo que no pase por 8 mm y tira el polvo que pase por una tela mosquitera. *Criterio de éxito:* granos de tamaño parecido, sin polvo al frotar un puñado seco.
- 6. **Lava y satura.** En un cubo con agua, remueve, espera 30 s y tira el agua negra con lo que flote. Repite hasta que salga casi transparente. Déjalo en remojo al menos una noche para que el agua llene los poros. *Criterio de éxito:* agua de aclarado gris clara y casi todo el carbón en el fondo; tira lo que siga flotando.
- 7. **Prueba de decoloración** (sirve para comparar carbones y para vigilar el lecho, G.6): en dos vasos iguales pon 200 mL de agua con 1 gota de tinta vegetal o té fuerte; añade a uno un puñado del carbón a probar y al otro un puñado igual de carbón de referencia; agita 10 min y deja posar. *Criterio de éxito:* el carbón bueno deja el agua claramente más clara que el de referencia, o igual si la referencia es carbón nuevo.
- 8. **Activación con vapor (opcional; ante la duda, omítela).** La industrial trabaja entre 700 y 1000 °C y abre más poros quemando parte del carbón. No hay datos fiables de cuánto mejora un carbón que ya se hizo a alta temperatura: si viene de gasificador, probablemente no compense. Si la haces (N2), lee antes Seguridad:
 - Usa un recipiente de hierro, nunca de barro, lleno de granos hasta 2/3, con tapa atravesada por un **respiradero** corto y por un **tubo de hierro de al menos 1 m con un embudo arriba** para meter el agua lejos del fuego.
 - Calienta hasta que el recipiente esté al rojo (rojo cereza a anaranjado, ≈ 800 a 900 °C, **verificar**) y mantenlo 1 a 2 h (**verificar**). Enciende el gas que sale por el respiradero.
 - Vierte por el embudo muy poca agua cada vez (unos 50 mL cada 5 a 10 min, **verificar**), con la cara apartada del respiradero y del embudo, porque sale vapor a golpes.
 - **Deja de echar agua al menos 15 min antes de terminar** y sigue calentando hasta que **no haya llama en el respiradero** (gas agotado). Si cerraras con gas dentro, al enfriar entraría aire y la mezcla podría inflamarse, hacer saltar la tapa y lanzar brasas.
 - Solo entonces retira el fuego, **tapa el respiradero y el embudo con arcilla o arena húmeda** y deja enfriar.
 - **No abras hasta poder apoyar la mano en la tapa.** *Criterio de éxito:* granos más ligeros y porosos (pésalos antes y después) que, lavados, superan al mismo carbón sin activar en la prueba de decoloración (paso 7).

G. Montar y usar el biofiltro de carbón

1. **Colócalo después de la arena**, nunca antes. *Criterio de éxito:* el agua que entra al carbón ya es clara.
2. **Dimensiona por tiempo de contacto.** Los lechos de campo trabajan con 2,5 a 18 h de contacto (paso F.5). En el filtro intermitente, haz que **cada tanda completa se quede dentro del carbón durante la pausa** (6 a 12 h): volumen de poros del lecho $\geq$ tanda. Mide la porosidad entre granos: llena un frasco de 1 L con carbón ya saturado, añade agua hasta el borde y mide cuánta cupo; porosidad = litros de agua / 1 L. Ejemplo con 0,45: $12 / 0,45 \approx 27$ **L de carbón**, que en un recipiente de 30 cm ocupan $27\,000\text{ cm}^3 / 707\text{ cm}^2 \approx 38$ cm. *Criterio de éxito:* porosidad medida, lecho calculado y recipiente elegido.
3. **Monta el recipiente como el biosand, más simple:** 5 cm de grava de drenaje alrededor de la boca del tubo, el carbón encima y el codo de salida por encima de la superficie del carbón, con la misma precaución contra el sifón (C.2). Encima, un paño o plato perforado. Llena primero de agua y echa el carbón dentro. *Criterio de éxito:* con el filtro parado queda una lámina de agua visible sobre el carbón y nada flota.

4. **Aclara antes de usar:** pasa 2 o 3 tandas y tíralas. *Criterio de éxito:* sale sin color gris ni partículas.
5. **Desinfecta después del carbón,** siempre: hierve, clora o SODIS. Si cloras, hazlo **a la salida** del carbón, que elimina el cloro. *Criterio de éxito:* el agua almacenada huele ligeramente a cloro, o se hirvió.
6. **Sustituye el carbón** cuando vuelva el sabor o el olor que antes quitaba o cuando, en la **prueba de decoloración mensual** (F.7) con un puñado sacado de la capa superior del lecho, decolore claramente menos que carbón nuevo preparado igual. No hay un intervalo publicado: el sistema de Tailandia ha pasado varios ciclos de sustitución, pero Kearns et al. (2021) no dan meses. No reutilices el carbón usado para agua sin reactivarlo; quémalo al aire libre, lejos de las personas. *Criterio de éxito:* fecha de carga y resultado de cada prueba mensual anotados en el recipiente.

H. Construir el filtro comunitario de flujo continuo (N1-N2)

1. **Elige el sitio:** por encima de la zona de inundación, cuesta abajo de la toma y cuesta arriba del depósito, y como mínimo a **30 m** de letrinas y pozos negros (Sphere 2018), más lejos de corrales si el terreno drena hacia el filtro. *Criterio de éxito:* el agua va de la toma al filtro y al depósito por gravedad.
2. **Excava o levanta el vaso.** Altura: **0,3 a 0,5 m** de dren y gravas + **0,8 a 0,9 m** de arena + agua sobrenadante + **0,2 a 0,3 m** de resguardo (Visscher et al. 1987; Thames Water 2005). La OMS/IRC recomienda **1 m** de agua sobrenadante; con menos se puede, pero hay menos carga para empujar el agua y hay que raspar más a menudo. Impermeabiliza con arcilla amasada y apisonada en capas (unos 5 cm por capa, **verificar**) o con mampostería con mortero de cal (N2). *Criterio de éxito:* lleno de agua, el nivel no baja más de 1 cm/día aparte de la evaporación; si baja más, añade otra capa de arcilla.
3. **Dren:** tubos de 6 cm de diámetro separados 1 m (Visscher et al. 1987), de barro cocido colocados a tope con las juntas abiertas algo más estrechas que las piedras más finas de la capa de grava que los cubre, o un canal de piedras planas, con ligera pendiente hacia la salida. *Criterio de éxito:* el agua vertida en el extremo alto llega a la salida sin encharcarse.
4. **Gravas de soporte,** de abajo arriba (Visscher et al. 1987, en Thames Water 2005): **16 a 23 mm, 15 cm; 4 a 5,6 mm, 10 cm; arena gruesa de 1 a 1,4 mm, 10 cm.** Lávalas hasta que el agua salga clara. *Criterio de éxito:* capas planas; un puñado de arena filtrante echado con agua sobre la capa superior no desaparece entre los granos.
5. **Arena:** 0,8 a 0,9 m de espesor inicial (Visscher et al. 1987), echada dentro del agua como en C.3-C.4. Marca en la pared la cota inicial y la mínima (0,5 a 0,6 m). *Criterio de éxito:* superficie plana (± 2 cm).
6. **Salida y unión entre unidades:** el dren sale a una arqueta cuyo vertedero queda **ligeramente por encima de la superficie de la arena** (Huisman y Wood 1974, en Thames Water 2005), para que el lecho nunca se vacíe; delante, un tapón o compuerta de madera regula el caudal. Une los drenes de las dos unidades con un **tubo de 6 cm con tapón** para poder llenar una desde abajo con agua filtrada de la otra. *Criterio de éxito:* con la entrada cerrada, el agua deja de salir y queda sobre la arena; con el tapón cerrado, no pasa agua de una unidad a otra.
7. **Entrada:** un rebosadero en la pared a la altura máxima del agua sobrenadante devuelve el exceso al cauce; la entrada vierte sobre una losa o piedra plana. *Criterio de éxito:* con la entrada abierta del todo, el nivel se estabiliza en el rebosadero y la arena no se mueve.
8. **Llenado inicial desde abajo** con agua ya filtrada (de la unidad gemela por el tubo de unión o de otro filtro vertida en la arqueta con la compuerta abierta), hasta cubrir la arena; si solo hay agua sin filtrar, llena por arriba sobre la piedra plana (Thames Water 2005). Después abre la entrada normal. *Criterio de éxito:* el nivel sube pocos cm por minuto, sin burbujas.
9. **Regula el caudal de diseño** con la compuerta, midiendo con cubo y reloj (A.3: 10 L en unos 7 min por unidad). Compruébalo **cada día** (Visscher et al. 1987) y abre poco a poco según la capa frena el paso; un ajuste grande de golpe empeora el agua (Thames Water 2005). *Criterio de éxito:* el cubo se llena en el tiempo de diseño en la comprobación diaria.
10. **Funcionamiento 24 h** hacia un **depósito cubierto** de al menos el **40 % de la producción diaria** (Visscher et al. 1987; en el ejemplo, 1,6 m³), del que se saca agua con grifo. Durante la maduración, tira el agua o desinfectala. *Criterio de éxito:* el depósito nunca se vacía y el filtro nunca se para.
11. **Cubre el filtro** con un tejadillo de ramas, cañizo o tablas: la luz favorece las algas, que colmatan antes el filtro (manual de Pensilvania). *Criterio de éxito:* sin algas flotantes ni excrementos en el agua.

Verificación

Con medios N1, sin laboratorio:

- **Transparencia:** el agua filtrada se ve claramente más limpia que la de entrada. Una marca negra vista con nitidez a través de 30 cm de agua indica mejora, **no** que se haya llegado a 1 NTU; para eso hace falta turbidímetro.
- **Olor y sabor:** sin olor a podrido ni a moho. Si huele a podrido, la capa está sin oxígeno: revisa la lámina de agua (5 cm) y la pausa máxima (48 h).
- **Caudal:** anótalo cada semana. Una caída lenta es normal; un aumento brusco indica lecho removido, grieta o canal junto a la pared (el agua no se filtra).
- **Lámina de agua en reposo** de 5 cm (4 a 6 cm) en el biosand; arena siempre cubierta en el comunitario.
- **Carbón:** prueba de decoloración mensual (F.7).
- **Salud:** que baje la diarrea en la casa o la aldea respecto a antes (indicador tardío pero real).

Con más medios (N3-N4):

- **Turbidez** de salida < 1 NTU con turbidímetro.
- **Prueba de ácido sulfhídrico** (tira de papel en frasco de 20 mL): incuba a **25 a 35 °C** y lee a las 24 y 48 h; si ennegrece, hay contaminación fecal probable. Por debajo de unos 20 °C tarda mucho más y puede dar falsos negativos (Pillai et al. 1999).
- **E. coli** por filtración en membrana o sustrato cromogénico: el objetivo de la OMS es 0 en 100 mL (OMS 2011, tabla 7.10), que en la práctica **solo se alcanza con desinfección final**.
- **Agotamiento del carbón:** echa agua con olor a cloro **directamente sobre el lecho de carbón**, nunca a través del biosand (D.5). Si la salida del carbón huele a cloro, está agotado.

Errores frecuentes

Síntoma	Causa probable	Solución
El agua sale casi tan deprisa como se vierte	Arena gruesa o demasiado lavada; canal junto a la pared	Sustituir los 10 cm superiores por arena más fina; apretar arena húmeda contra la pared
Caudal muy lento desde el primer día	Arena con muchos finos o arcilla	Sacar la capa superior y repetir la decantación (B.4)
El caudal baja a los pocos días	Agua de entrada turbia	Decantar o colar antes; «remover y tirar» o raspar
Arena con zonas secas o grietas	Salida por debajo de la superficie de la arena	Elevar el codo o el vertedero por encima de la arena
Nivel en reposo < 4 cm pese a la arena bien nivelada	El tubo sifona: el pico cae demasiado y sigue tirando del agua	Acortar la caída del pico a ≤ 5 cm o abrir un agujero de 2 a 3 mm en lo alto del codo
Agua con olor a huevo podrido	Capa sin oxígeno: más de 5 cm de agua en reposo, pausas de más de 48 h	Ajustar la altura de la arena; usar a diario
Cráter en la arena bajo el chorro	Falta el difusor, o está roto o sumergido	Reponer el difusor por encima de la lámina de agua
Mejora y empeora según el día	Cambio de fuente de agua; agua clorada o jabonosa	Usar siempre la misma fuente; no echar cloro ni jabón
Arena en el agua de salida	Grava de separación ausente o demasiado gruesa	Rehacer las capas de grava
Agua gris tras el carbón	Polvo de carbón mal lavado	Lavar más; descartar las primeras tandas
El carbón flota y se sale	No se saturó de agua	Remojarlo hasta que se hunda antes de cargarlo
Vuelve el mal sabor	Carbón agotado	Sustituir el carbón
Diarrea pese al filtro	Filtro sin madurar, raspado reciente, recontaminación al almacenar o sin desinfección	Desinfectar siempre; recipiente de recogida tapado y con grifo o pico

Seguridad

- **Falsa seguridad (el riesgo principal).** Un filtro madurado retiene la mayoría de los patógenos, no todos; durante la maduración y tras cada limpieza, mucho menos. El carbón no retiene patógenos y puede cultivarlos. **Desinfecta siempre el agua filtrada.** Con agua de fuente fecal evidente (río bajo un poblado, charca con ganado), una tanda

sin desinfectar puede transmitir cólera, fiebre tifoidea, hepatitis A o rotavirus, que matan a niños pequeños por deshidratación.

- **Contaminantes químicos.** Ni la arena ni el carbón quitan la sal, los nitratos (peligrosos para lactantes de menos de 6 meses), el fluoruro, el arsénico ni la mayoría de los metales. Si la fuente está cerca de minas, escombreras, campos muy abonados o industrias, o hay manchas en los dientes o lesiones de piel frecuentes en la zona, busca otra fuente. El carbón agotado puede soltar lo adsorbido: sustitúyelo.
- **Recipientes.** Los vidriados antiguos o de alfarería tradicional pueden soltar plomo: usa barro sin vidriar o vidriados sin plomo. No uses bidones de combustibles, plaguicidas o productos químicos, ni maderas tratadas.
- **Polvo.** Cribar arena seca levanta polvo de sílice, que a la larga causa silicosis: criba en húmedo o al aire libre, con un paño húmedo sobre nariz y boca. El polvo de carbón irrita ojos y pulmones: tritura mojado.
- **Carbonización y carbón recién hecho.** El montículo y la fosa desprenden humo con monóxido de carbono: trabaja a barlovento (con el viento a la espalda) y nunca junto a viviendas. Pisar un montículo encendido puede hundirte en brasas: no te subas a él. Apagar carbón al rojo con agua suelta vapor y algo de monóxido e hidrógeno: hazlo al aire libre y a barlovento. El carbón puede reavivarse horas después y quemar el almacén: no lo ensaques caliente. Ropa de fibra natural, agua a mano y zona despejada de hojarasca.
- **Activación con vapor (opcional: ante la duda, no la hagas).** Riesgos: vapor que sale a golpes y quema la cara; gas combustible y **tóxico** (monóxido de carbono e hidrógeno); retroceso de llama si entra aire con gas dentro, con la tapa saltando y brasas despedidas. Por eso: solo al aire libre; agua por un tubo de al menos 1 m y poca cada vez, con la cara fuera de la vertical del respiradero y del embudo; dejar de echar agua 15 min antes y calentar hasta que no haya llama antes de sellar (F.8); no abrir hasta poder tocar la tapa; nunca en recipientes de barro, que estallan. Aparta a niños y animales.
- **Intoxicación por monóxido de carbono. No huele ni se ve.** Síntomas: dolor de cabeza, mareo, náuseas, cansancio, confusión. Ante el primero, **apártate hacia donde viene el viento, fuera del humo**, y aparta a los demás. Si alguien está inconsciente pero respira, **posición lateral de seguridad** al aire libre; si no respira, **respiración de rescate** (y compresiones torácicas si sabes hacerlas) y pide ayuda. **Nadie vuelve a la zona hasta que se haya apagado el fuego y ventilado.**
- **Filtros comunitarios y pozos.** Un vaso con agua o un hoyo junto al río es un riesgo de ahogamiento para niños: vállalo o tápalo. En terreno arenoso, las paredes de un hoyo se derrumban: no bajes a un hoyo más hondo que la cintura sin entibarlo o darle talud. Para rasparlo, usa tablas y nunca trabajes solo.
- **Higiene del mantenimiento:** el agua de «remover y tirar» y la arena raspada llevan patógenos. Lávate las manos con jabón y tíralas lejos de fuentes, pozos y huertos de verdura cruda.
- **Heladas:** el agua helada mata la capa biológica y rompe recipientes de barro: protege o entierra el filtro.

Variantes

- **Con menos recursos (N0):**
 - ▶ **Pozo junto al río (filtración en la orilla):** cava un hoyo poco profundo en terreno arenoso a 5 a 10 m del cauce (**verificar**) y saca el agua que rezuma; el terreno actúa de filtro. Mejora mucho la turbidez, pero no se controla la velocidad: desinfecta siempre. Vállalo o tápalo y vigila el derrumbe (ver Seguridad).
 - ▶ **Recipientes de corteza, cestería impermeabilizada con arcilla o cuero:** funcionan igual si se respetan la lámina de 5 cm, la salida elevada sin sifón y el caudal máximo; duran menos.
 - ▶ Sin carbón: se pierde la mejora de sabor y olor, no la eliminación de patógenos (que el carbón no daba).
- **Con más recursos:**
 - ▶ **N2:** vaso de mampostería con mortero de cal, tubos de barro vidriado, chapa perforada de difusor, gasificador TLUD de chapa para el carbón, recipiente de hierro para activarlo.
 - ▶ **N3:** filtro de hormigón con molde de acero (CAWST v10, 70 a 75 kg, vida útil de más de 30 años según CAWST 2009); tamices normalizados para d10 y CU; **prefiltros de grava** para agua más turbia.
 - ▶ **N4:** carbón activado granular comercial (del orden de 15 veces más capacidad que un buen carbón vegetal; Kearns et al. 2021); control de turbidez y *E. coli*; filtros de plástico moldeado (unos 3,5 kg).
- **Escalado:**
 - ▶ **Familia:** 1 biosand (24 a 72 L/día) + 1 lecho de carbón de ~27 L + desinfección + recipiente con grifo.
 - ▶ **Aldea (100 a 1000 personas):** 2 o más unidades de flujo continuo; lo habitual son 5 a 200 m² por unidad (Visser et al. 1987), aunque las pequeñas de menos de 1 m² sirven para grupos reducidos si se raspan desde el borde. Depósito cubierto, un cuidador formado que mide el caudal a diario y escalona los raspados.

- **Ciudad:** decenas de lechos (el filtro lento municipal se usa desde 1829 en Londres), con decantación previa, lavado mecánico de la arena, cloración final y laboratorio. El filtro lento ocupa **hasta 10 veces** más superficie que uno rápido (Global WASH Cluster): a partir de cierto tamaño se pasa a coagulación con filtración rápida.

Fuentes

- Huisman, L. y Wood, W.E. (1974). *Slow Sand Filtration*. OMS, Ginebra. Capa biológica, vertedero de salida, raspado y recarga por zanjas.
- Visscher, J.T. et al. (1987). *Slow Sand Filtration for Community Water Supply*. IRC Technical Paper 24. 0,1 m/h, d10 0,15 a 0,30 mm, CU < 5, lecho 0,8 a 0,9 m (mínimo 0,5 a 0,6 m), 1 m de agua sobrenadante, 5 a 200 m² por unidad, gravas de soporte, dren, depósito del 40 %, re-maduración, control diario.
- Thames Water y University of Surrey (2005). *Slow Sand Filters* (water-e). sswm.info. Tabla de criterios, apdo. 4.2.11 (gravas), densidades de la arena, prueba de limo, raspado de 1 a 3 cm, zanjas, llenado inverso.
- CAWST (2009). *Biosand Filter* (ficha y manual v10). 0,4 L/min, 600 L/h/m², lámina de 5 cm, pausa de 1 a 48 h, maduración de hasta 30 días, eficacias, 50 NTU y prueba de la botella de 2 L, «remover y tirar» (4 L, umbral de 0,1 L/min), orden de preferencia de la arena.
- CAWST (2012). *Biosand Filter Construction Manual*. Arena < 0,7 mm, gravas de 0,7 a 6 y 6 a 12 mm, prueba de caudal.
- Global WASH Cluster. *Compendium of Water Supply Technologies in Emergencies*, fichas T.9 y H.5. Velocidad de 0,1 a 0,4 m/h, turbidez, eficacias, recarga a 0,6 m, vaciado a 10 cm bajo la arena, re-maduración, superficie frente a filtro rápido.
- Pennsylvania DEP. *Drinking Water Operator Certification Training, Module 17*, unidad 2. d10, CU, cubierta.
- Kearns, J.P. et al. (2021). *Environmental Engineering Science*, PMC8165476. Carbón de gasificador ≥ 850 °C, adsorbedor modelo de 4,5 mm y 2,5 h, sistema de Tailandia de 7,5 mm y 18 h, tamaño de grano, carbón activado.
- FAO (1983). *Simple Technologies for Charcoal Making*. Forestry Paper 41, cap. 5 y 6. Montículo y fosa: color del humo, sellado, enfriado, rendimiento, temperatura.
- Ferguson, R.I. y Church, M. (2004). *Journal of Sedimentary Research* 74: 933-937. Velocidad de caída.
- Pillai, J. et al. (1999). *Water Science and Technology* 40(2): 85-90. Prueba de H₂S según temperatura.
- OMS (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4.^a ed., cap. 7: tabla 7.7 (reducción por filtración lenta) y tabla 7.10 (*E. coli* 0 en 100 mL).
- Howard, G. y Bartram, J. (2003). *Domestic Water Quantity, Service Level and Health*. OMS. 7,5 L/persona/día para beber y cocinar; unos 20 L como acceso básico.
- Sphere Association (2018). *The Sphere Handbook*, 4.^a ed. Distancia mínima de 30 m entre letrinas y fuentes.

Relacionados: Hervido del agua (p. 3) Filtros de cerámica y carbón (p. 38) Desinfección química del agua con cloro y yodo (p. 18) Desinfección solar (SODIS) (p. 9)

AGUA Y SANEAMIENTO › POTABILIZACIÓN

Filtros de cerámica y carbón

Fabricar, probar y usar filtros de maceta cerámica con plata, filtros de vela y etapa de carbón; qué retienen y qué no.

N1 · Cerámica y agricultura · Borrador · civilizationrebuild.org/es/01-agua-y-saneamiento/potabilizacion/filtros-de-ceramica-y-carbon/

Borrador sin revisión técnica. Puede contener errores: contrasta cifras y procedimientos antes de aplicarlos. Contiene 13 datos marcados como «verificar».

Resumen

Un filtro de maceta cerámica es una vasija de barro cocido poroso de unos 10 l que se cuelga dentro de un recipiente con tapa y grifo. El agua atraviesa la pared por gravedad (1-2 l/h cuando el filtro es nuevo) y deja atrás tierra, casi todas las bacterias, los protozoos y los huevos de gusanos. Si la cerámica se impregna de plata, mueren más bacterias y crece menos biopelícula. Una familia obtiene así 10-25 l/día de agua filtrada, según la turbidez, sin gastar leña en hervirla, con un filtro que dura 1-3 años. **No retiene bien los virus** (reducción típica del 90 %, a veces menos) ni elimina sustancias químicas disueltas (arsénico, nitratos, flúor, sales). Si el agua de origen puede tener contaminación fecal (río, charca, pozo abierto) o hay brotes, desinfecta después del filtro. Una etapa de carbón granular mejora el sabor y el olor y retiene cloro y parte de la materia orgánica, pero **no desinfecta**. Este artículo también trata los filtros de vela cerámica.

Requisitos previos

- **Conocimientos:** saber trabajar la arcilla y cocer en horno cerámico (tema «Hornos cerámicos», aún sin artículo). Para desinfectar después del filtro: Hervido del agua (p. 3), Desinfección química del agua con cloro y yodo (p. 18) o Desinfección solar (SODIS) (p. 9). La preparación del carbón granular (trituration, cribado, lavado, activación) está en Filtro lento de arena y biofiltro de carbón (p. 28).
- **Materiales (receta de RDIC, ≈ 6 filtros por tanda):**
 - ▶ 30 kg de arcilla seca y en polvo. Sirve la de hacer ladrillo o la de alfarería roja (terracota), siempre que pase las pruebas del paso 1. Con 8,9-10 kg de combustible y 12,5 l de agua suman ≈ 52 kg de pasta, que dan ≈ 6 bloques de 8,0-8,2 kg (RDIC, pág. 33).
 - ▶ 8,9-10 kg de material combustible molido y cribado: cascarilla de arroz, serrín de madera no tratada, cáscara de café. Tamaño de partícula entre 0,5 y 1 mm.
 - ▶ 12,5 l de agua limpia.
 - ▶ Para la plata (opcional, recomendada): 100 g de AgNO_3 ($\geq 99\%$) para 1,5 l de concentrado, suficiente para unos 900 filtros. Por cada 60 filtros: 100 ml de ese concentrado y 18 l de agua destilada o de lluvia. **No disuelvas todo el nitrato en el agua de trabajo** (pondrías 13-14 veces la dosis). Alternativa: plata coloidal comercial (paso 17).
 - ▶ Por cada filtro terminado: un recipiente receptor de 20-40 l con tapa (plástico alimentario, barro sin vidriar o con vidriado sin plomo, o madera con cera de abejas o sin sellar; **no** pinturas ni barnices), un grifo, un aro de apoyo para el borde de la maceta y un cepillo de cerdas blandas.
 - ▶ Combustible para el horno: RDIC quema unos 1,5 m³ de leña seca por hornada de 96 filtros.
- **Herramientas:**
 - ▶ Tamices de 0,5 mm y 1 mm (malla de alambre, N2; tela tupida o cesta fina, N1, con menos precisión).
 - ▶ Pisón o mazo para triturar la arcilla (N0-N1). Balanza o cubos iguales para medir por volumen (N1).
 - ▶ Molde de dos piezas (macho y hembra) de madera, barro cocido o metal, con prensa de palanca o de gato. Sin molde, torno de alfarero (N1).
 - ▶ Horno cerámico de tiro que alcance 850-900 °C (N1). Conos pirométricos o termopar si los hay (N3-N4).
 - ▶ Recipiente graduado de 1 l y reloj o reloj de arena de 1 h (N1).
 - ▶ Guantes, gafas y mascarilla para el polvo y la plata (N1-N4 según el tipo).
- **Tiempo y personas:** unas 3-4 semanas desde la mezcla hasta el filtro listo: 1 día de mezcla y prensado, 1-3 semanas de secado, 1-2 días de cocción y enfriado, 1 día de remojo y prueba de caudal, 3-8 días de secado y pintado con plata. Un taller de 3-4 personas con prensa produce unos 50 filtros al día (Potters for Peace). Al torno, un alfarero hace muchos menos y con pared menos uniforme.

Principio de funcionamiento

Por qué el agua pasa y los microbios no. RDIC da poros de 0,2-3 μm (pág. 9; en la pág. 8, 0,6-3 μm citando a Lantagne). Una bacteria mide alrededor de 1-3 μm , un quiste de protozoo unos 4-15 μm y un huevo de helminto unos 45 μm . Otras mediciones dan poros mayores: van Halem, una media de 40 μm por punto de burbuja; Oyanedel-Craver y Smith, 0,02-15 μm . Es decir, la retención no es solo un tamiz: también actúan la sedimentación, la difusión y la adsorción en las paredes de los poros, y todo eso necesita **tiempo de paso**. Por eso un filtro con más caudal retiene peor. Un virus mide unos 0,02 μm y solo se retiene una fracción, por adsorción.

A través del barro puro el agua pasaría demasiado despacio. Por eso se mezcla la arcilla con un **material combustible** (serrín o cascarilla), que arde en el horno y deja huecos que acortan el camino por la arcilla densa. Mientras no formen canales continuos de lado a lado, el filtrado lo sigue haciendo la arcilla entre ellos. De ahí salen las variables que mandan:

Variable	Si se pasa por arriba	Si se queda corta
Proporción de combustible	Huecos conectados: caudal alto, pasan bacterias, pieza frágil	Caudal < 1 l/h: la familia deja de usar el filtro
Tamaño de partícula del combustible	Poros grandes: más caudal y peor retención con la misma masa	Poco caudal
Temperatura de cocción	> 950 °C: la arcilla empieza a vitrificar, se cierran poros y cae el caudal (verificar)	< 600 °C: se deshace en agua. Entre 600 y 800 °C no se deshace, pero queda blanda, con núcleo negro y carbón sin quemar (verificar): aguantar 1 h en agua no basta para aprobarla
Grosor de pared	Menos caudal	Más caudal y menos resistencia

El caudal sirve de control de calidad. No se ve un poro de 1 μm , pero sí cuántos litros atraviesan la pared en una hora. Un caudal demasiado alto delata grietas, poros grandes o huecos conectados, y acorta el tiempo de paso y de contacto con la plata. En un estudio de Potters Without Borders (2013), los filtros que empezaban por encima de 1,7 l/h bajaron del 99 % de reducción de coliformes, y se desaconseja bajar del 53 % de arcilla en la mezcla (sin especificar si en masa o en volumen).

La plata. Los iones de plata (Ag^+) dañan las membranas y enzimas de las bacterias. Al pintar el filtro con nitrato de plata, los iones se reducen dentro de la cerámica a partículas de plata metálica, que liberan poco a poco trazas que inactivan bacterias al contacto y frenan la biopelícula. Los estudios no coinciden en cuánto aporta:

- Oyanedel-Craver y Smith (2008): la plata mejoró la retención de *E. coli*; pesó más la cantidad aplicada que la forma de aplicarla.
- van Halem (2006): filtros de Nicaragua sin plata quitaron los coliformes del agua de canal igual de bien que los tratados; con cargas altas de *E. coli* la plata sí mejoró el resultado. Los filtros sin plata retuvieron **mejor** el bacteriófago MS2.
- Brown (2007), citado por RDIC (pág. 8): en campo, los filtros pintados con plata rindieron parecido a los que no la llevaban.

Conclusión práctica: la plata es un **refuerzo**, no la base del filtro. Un filtro sin plata bien fabricado sigue siendo útil, pero conviene desinfectar después.

Eficacia esperable. La fila de la tabla 7.8 de la OMS es «Porous ceramic and carbon block filtration» y agrupa también velas y bloques industriales (LRV = reducción logarítmica: 1 LRV = 90 %, 2 = 99 %, 4 = 99,99 %):

Grupo	LRV de referencia (producto corriente)	LRV máximo (bien fabricado y usado)
Bacterias	2 (99 %)	6
Virus	1 (90 %)	4
Protozoos	4 (99,99 %)	6

Las macetas de fabricación local suelen quedar **por debajo de 1 LRV en virus**. En campo, RDIC midió una reducción media de *E. coli* del 95,1 % y hasta el 99,99 %, y entre sus usuarios hubo un 46 % menos de diarrea (Brown y Sobsey, 2006, citado por RDIC). En laboratorio, van Halem obtuvo 4-7 LRV para *E. coli* y 0,5-3 LRV para MS2 (indicador de virus); Lantagne (2001) midió 1,8-4,9 LRV de *E. coli*. **Los virus son el punto débil:** no des su retención por segura.

El carbón. El carbón activado tiene una superficie interna enorme donde se adsorben moléculas orgánicas: compuestos del sabor y del olor, cloro residual, parte de los plaguicidas y disolventes. **No mata microbios.** Retiene materia orgánica que alimenta bacterias, así que dentro crece biopelícula y el agua puede salir con más bacterias heterótrofas de las que entró (OMS, *Heterotrophic Plate Counts*, 2003). Casi no retiene sales, nitratos ni flúor, y el carbón vegetal normal apenas retiene arsénico (**verificar**). En un filtro doméstico mejora el sabor y reduce ciertos químicos orgánicos, pero no añade seguridad microbiológica.

Procedimiento

El procedimiento principal es el filtro de maceta, en siete partes: A) materias primas y receta, B) forma, secado y cocción, C) control de calidad, D) plata y montaje, E) uso y mantenimiento, F) filtros de vela y G) etapa de carbón.

A. Materias primas y receta

1. **Comprobar la arcilla.** Humedece un puñado, haz un cordón de ≈ 1 cm de grueso y ciérralo en un anillo de $\approx 2,5$ cm. Haz también una barrita de $10 \times 2 \times 1$ cm con dos rayas separadas exactamente 10 cm. Sécala a la sombra 7 días y cuécela con la próxima hornada. Averigua si la arcilla viene de una zona con arsénico en el agua subterránea: lo necesitas en el paso 13. *Criterio de éxito:* el anillo no se agrieta al cerrarlo. La barrita sale entera, sin grietas ni alabeo, y tras cocerla la distancia entre rayas sigue entre 8,8 y 9,2 cm (merma total del 8-12 % (**verificar**)). Si se agrieta o merma más, mezcla arena fina o chamota (barro cocido molido) en tandas del 10 % hasta que pase. Si se desmorona o no liga, mézclala con una arcilla más plástica.
2. **Secar y moler la arcilla.** Sécala al sol por completo (terrones que se rompen secos y no se aplastan como plastilina). Rómpelos con pisón sobre suelo limpio y pásalos por un tamiz de $\approx 1-2$ mm, al aire libre, con mascarilla y de espaldas al viento (ver Seguridad). *Criterio de éxito:* polvo suelto sin grumos mayores de 2 mm ni raíces ni piedras.
3. **Preparar el combustible.** Muele la cascarilla o el serrín si hace falta y crívalo: usa lo que pasa por 1 mm y queda en 0,5 mm. Usa siempre la misma fuente y el mismo tamizado, porque las partículas grandes dan más caudal con la misma masa. Nada de serrín de madera tratada, pintada ni de aglomerado. *Criterio de éxito:* partículas uniformes a simple vista, sin astillas mayores de 1 mm ni polvo fino en cantidad.
4. **Mezclas de prueba (solo la primera vez o al cambiar de material).** La receta de referencia de RDIC es 30 kg de arcilla en polvo, 8,9-10 kg de cascarilla de arroz molida y 12,5 l de agua: un 23-25 % de combustible sobre la masa seca. Potters for Peace trabaja por volumen, entre 60:40 y 50:50 (arcilla:serrín); Potters Without Borders desaconseja bajar del 53 % de arcilla. Empieza en 55:45 o 60:40 y trata 50:50 como límite. Sin balanza, mide con el mismo cubo. Haz 3 mezclas separadas por 5 puntos (por ejemplo 55:45, 60:40 y 65:35), fabrica 3-5 filtros de cada una y llévalos hasta el paso 11 (y el 14 si puedes). *Criterio de éxito* (regla práctica de este artículo): te quedas con la receta en la que al menos 4 de cada 5 piezas dan 1,0-2,0 l/h en la primera hora.
5. **Mezclar.** Mezcla primero en seco 10 min (con pala sobre una lona), con la boca tapada. Añade el agua poco a poco con una regadera y amasa otros ≥ 10 min; después golpea la pasta contra la lona para sacar el aire. Divide en bloques de 8,0-8,2 kg (medida de RDIC para su molde; ajústala al tuyo con ≈ 5 % de sobra). *Criterio de éxito:* color uniforme, sin vetas de serrín ni grumos secos. Una bola de 5 cm apretada en la mano mantiene la forma, no se agrieta en el borde y no se pega a la palma.

B. Forma, secado y cocción

6. Formar la maceta.

- *Con prensa y molde (Potters for Peace, RDIC):* forra ambas piezas del molde con bolsa de plástico fina. Coloca el bloque y cierra hasta que rebose barro por los orificios de alivio; retira lo sobrante y abre. Medidas de referencia del filtro de Potters for Peace: $\approx 28-30$ cm de boca por ≈ 25 cm de alto, unos 10 l de capacidad y pared de 10-12 mm (Potters for Peace; Engineering for Change).
 - *Al torno (N1):* levanta una maceta de la misma forma y la misma pared de 10-12 mm. Comprueba el grosor con una aguja marcada en 5-6 puntos del fondo y las paredes: más de 2 mm de diferencia da zonas de paso preferente.
 - En ambos casos, repasa el borde con pincel húmedo, rellena huecos con barro, alisa el interior con rasqueta blanda y marca fecha y lote. Tras 3-4 h a la sombra (o una noche), raspa la piel lisa interior para abrir poros. *Criterio de éxito:* forma simétrica, borde firme sin fisuras, pared igual en todos los puntos medidos. Una pieza deformada vuelve a la masa: en crudo se recicla, cocida ya no.
7. **Secar.** Seca a la sombra el primer día y luego en estantes ventilados, tapados si llueve. RDIC necesita 7-15 días en estación seca y 15-18 en la húmeda; Potters for Peace, 1-3 semanas. Juzga por las piezas de abajo, que secan

más lento. *Criterio de éxito:* color claro y uniforme, no está fría al tacto contra la mejilla y al darle un golpecito suena seco.

8. **Cocer.** Carga el horno con separadores de barro; se pueden apilar en torres de 3-5, boca con boca y fondo con fondo. Cierra la puerta con ladrillos y sella las rendijas con barro. A la vista de la mirilla, pon testigos:
 - Si los hay, conos pirométricos Orton pequeños: RDIC usa el 014 como aviso y el 012 como final ($\approx 866^\circ\text{C}$; págs. 41 y 44).
 - Si no, **anillos de prueba** del mismo barro, de ≈ 3 cm, ensartados en una varilla de hierro (N2) o de barro cocido previamente, que se puedan sacar por la mirilla con un gancho.

Sigue esta curva:

- **Deshidratación:** fuego suave, respiraderos abiertos, hasta $\approx 100^\circ\text{C}$; mantenlo 2 h. Sin termómetro: el humo sale blanco y húmedo, y una chapa, un tiesto o un vidrio fríos puestos en la chimenea se empañan; sigue hasta que dejen de empañarse (**verificar**). Subir más rápido revienta las piezas por el vapor.
- **Subida:** añade leña de forma gradual. Llegar a la temperatura final lleva 8-10 h.
- **Temperatura final: 850-900 °C.** RDIC cuece a 866°C ; Potters for Peace, a unos $860-900^\circ\text{C}$. Sin conos, busca **rojo cereza claro** ($\approx 850-900^\circ\text{C}$), mirado con el horno a la sombra o de noche; no esperes al naranja, que ya es más caliente. Entonces saca un anillo, déjalo enfriar 5 min y rómpelo. Si tiene núcleo negro o se raya con la uña, mantén el fuego 30-60 min más y saca otro; repite.
- **Fin de la cocción y enfriado** (RDIC, pág. 44, sin meseta): al fundirse el cono 012 o aprobar el anillo, retira el combustible, cierra los registros y deja el horno cerrado 9 h. Después ábrelo y deja que enfríe 24 h antes de descargar.

Apunta leña, horas y color, y **guarda anillos de una hornada que dio buenos filtros** para comparar color, sonido y dureza en las siguientes. *Criterio de éxito:* el anillo roto tiene el mismo color por dentro que por fuera, sin núcleo negro (carbón sin quemar), no se raya con la uña y suena como los anillos de referencia. Las macetas **suenan como una campana** al nudillo y no manchan la mano. Que no se ablanden en 1 h de agua es necesario pero no suficiente.

C. Control de calidad de cada filtro

9. **Inspección y prueba de sonido.** Mira cada maceta con una linterna por dentro y golpéala con el nudillo en 4 puntos del borde y 2 del fondo. *Criterio de éxito:* sonido claro y sostenido en todos los puntos y ninguna grieta visible. Un sonido sordo o rajado delata una grieta aunque no se vea: descarta la pieza. Tampoco admitas grietas en el borde de más de 1 cm, porque crecen con el uso.
10. **Remojo.** Sumerge las macetas por completo en agua limpia **al menos 5 h**; lo normal es toda la noche. Así se saturan los poros y todas se miden igual. *Criterio de éxito:* al sacarlas no salen burbujas y la superficie queda uniformemente oscura.
11. **Prueba de caudal (a cada filtro, sin excepción).** Coloca la maceta saturada sobre un soporte que la deje gotear a un recipiente limpio. Llénala **hasta el borde**, rellénala en ese momento si ha bajado y pon el reloj en marcha. A **1 h**, mide el agua recogida con el recipiente graduado (o lo que ha bajado el nivel, con una regla en T calibrada litro a litro en una maceta impermeabilizada del mismo molde). *Criterio de aceptación* (el mismo en todo el artículo):
 - **Aceptar 1,0-2,0 l/h** en la primera hora.
 - **Entre 2,0 y 2,5 l/h**, solo si la prueba bacteriológica del lote (paso 14) da $\geq 99\%$. Sin prueba, rechazar.
 - **Rechazar por encima de 2,5 l/h** (poros grandes, huecos conectados o grieta) y **por debajo de 1,0 l/h** (filtra demasiado poco y acabará sin usarse).

Contexto: RDIC fija un óptimo de 1,8-2,5 l/h y acepta 1,5-3,0 (4.6, pág. 46); Potters for Peace diseña para 1-2 l/h (Oyanedel-Craver y Smith, pág. 927); Potters Without Borders vio caer la reducción de coliformes por debajo del 99 % por encima de 1,7 l/h; el CMWG da 1-3 l/h. Esas cifras de fábrica se miden en la primera hora con el filtro lleno y saturado, y no son el caudal medio en uso, que es menor (van der Laan et al., 2017). Si una hornada da más rechazos por caudal alto de lo habitual, corrige la receta (menos combustible o más fino); si por caudal bajo, lo contrario.

12. **Prueba de fugas localizadas.** Durante la prueba de caudal, observa el exterior a los 10-15 min. *Criterio de éxito:* la pared se humedece de manera uniforme y gotea repartida. Un chorrito, una línea mojada más oscura

o un goteo concentrado indican grieta: descarta. Rompe o agujerea el fondo de las piezas rechazadas para que nadie las use como filtro.

13. **Arsénico y metales de la propia arcilla.** van Halem midió en el agua de un filtro camboyano $\approx 200 \mu\text{g/l}$ de arsénico la primera semana y aún $17 \mu\text{g/l}$ a las 12 semanas (valor guía OMS: $10 \mu\text{g/l}$). Un estudio en filtros de Kandal (Camboya) estimó $\approx 43,5 \text{ mg}$ de arsénico liberados por filtro, el 80 % en los primeros 100 l, y vio que el lavado lo reduce («Arsenic leaching from ceramic water filters», 2018). Por tanto:
 9. Si la arcilla procede de una región con arsénico en el agua subterránea y no puedes analizar, **no uses esa arcilla.** van Halem recomienda probar la lixiviación antes de elegir la arcilla.
 10. Si no hay alternativa, desecha como mínimo los primeros 100-200 l filtrados por cada filtro (**verificar**): por ejemplo, mantenlo lleno en el taller 3-4 días a 2 l/h antes de secarlo y pintarlo.
 11. Si hay análisis, mide el agua filtrada tras el lavado.
 12. Es un riesgo **crónico** (años de exposición). Unas semanas por encima de $10 \mu\text{g/l}$ pesan mucho menos que beber agua con contaminación fecal: no abandones el filtro por esto si no hay otra agua segura.

Criterio de éxito: agua filtrada transparente, sin sabor a barro; donde haya análisis, arsénico $< 10 \mu\text{g/l}$.

14. **Prueba bacteriológica por lotes (si hay medios).** De cada hornada, pasa agua de río o de charca por 2-3 filtros elegidos al azar y analiza *E. coli* o coliformes termotolerantes en 100 ml del agua de entrada y de la filtrada. A falta de laboratorio, el ensayo de presencia/ausencia de H_2S detecta fallos graves, pero no da el porcentaje. *Criterio de éxito:* reducción $\geq 99 \%$ frente al agua de entrada y, mejor, ausencia de *E. coli* en 100 ml. El método de análisis es tema del artículo pendiente «Análisis básico de calidad del agua».

D. Plata y montaje

15. **Secar las piezas aprobadas** tumbadas de lado durante 3-8 días. *Criterio de éxito:* han vuelto al color claro de la pieza seca.
16. **Preparar la solución de nitrato de plata (receta de RDIC, pág. 49).** Con guantes y gafas, lejos de niños y de la comida.
 15. **Concentrado:** disuelve los 100 g de AgNO_3 en 500 ml de agua destilada y completa hasta 1500 ml. Guárdalo en frasco de plástico opaco bien cerrado: la luz lo descompone. Da para ≈ 900 filtros.
 16. **Solución de trabajo:** 100 ml de concentrado + 18 l de agua destilada o de lluvia = 18,1 l, para unos 60 filtros. Prepara solo la que vayas a usar.

Cálculo de comprobación: 100 ml de concentrado llevan 6,67 g de AgNO_3 , y la plata es el 63,5 % de esa masa (108/170): 4,23 g de Ag. En 18,1 l dan $\approx 234 \text{ mg}$ de Ag por litro. Cada filtro recibe 300 ml, es decir, $\approx 70 \text{ mg}$ de Ag: $\approx 47 \text{ mg}$ dentro (200 ml) y $\approx 23 \text{ mg}$ fuera (100 ml). Si disolvieras los 100 g en 20 l, cada filtro recibiría $\approx 950 \text{ mg}$. *Criterio de éxito:* líquido transparente e incoloro. Si amarillea, se enturbia o forma posos oscuros, se ha estropeado (luz o agua con cloruros): prepara otra tanda con agua destilada.

17. **Pintar.** Llena un vaso marcado a 300 ml y a 100 ml. Pinta el interior con brocha, repartiendo por igual fondo y paredes, hasta que el nivel baje a la marca de 100 ml; pinta el exterior con el resto. No sumerjas: se desperdicia plata y el interior necesita más dosis. *Criterio de éxito:* todo el volumen absorbido, sin charcos ni chorretones, y la maceta seca a la sombra en unas horas. Oscurecerse con la luz es normal.
 - **Con plata coloidal:** van Halem (2006) describe 2 ml de plata coloidal al 3,2 % en 250 ml de agua ($\approx 64 \text{ mg}$ de Ag por filtro); Potters for Peace usa también 1 ml en 250 ml ($\approx 32 \text{ mg}$). En laboratorio se ha usado la inmersión 45 s en 800 mg/l (Oyanedel-Craver y Smith, 2008). La concentración comercial varía: lee la etiqueta y calcula para 30-70 mg de Ag por filtro (Potters for Peace 32-64 mg; RDIC 70 mg).
 - **Sin plata:** el filtro sigue reteniendo mecánicamente la mayoría de bacterias y protozoos, pero con menos margen y más biopelícula. Desinfecta siempre después y limpia el depósito más a menudo (paso 22).
18. **Montar el conjunto.**
 15. **Grifo:** en el depósito receptor (20-40 l; el de RDIC tiene 38 l y almacena $\approx 26 \text{ l}$ con el filtro puesto), a 3-5 cm del fondo (**verificar**) para que el poso quede debajo, con junta de goma o cuero y tuerca por dentro.
 16. **Aro:** en la boca del depósito, un aro de apoyo (plástico, madera o cuerda forrada) que reparta el peso (el filtro lleno pesa unos 16 kg), **tape la holgura** entre maceta y depósito y se incline hacia fuera, para que lo que salpique el borde caiga fuera del agua filtrada.
 17. **Filtro y tapa:** asienta el filtro y pon la tapa.

Criterio de éxito: con el depósito lleno hasta el grifo y la maceta vacía, en 30 min no gotea nada por el grifo ni por la junta. Un vaso de agua echado sobre el aro no entra en el depósito.

19. **Primeras cargas.** En el primer uso sale $\approx 30\%$ de la plata aplicada; RDIC desecha los primeros 33 l (pág. 48). Llena el filtro 3-4 veces y **tira esa agua** (≥ 33 l; más si el paso 13 lo exige). *Criterio de éxito:* el agua sale transparente y sin sabor a barro ni metálico.

E. Uso y mantenimiento

20. Uso diario.

20. **Agua turbia:** si no se lee un texto a través de 10 cm de agua en un vaso, déjala reposar 12-24 h y decanta, o cuélala por tela. Por encima de unas 50 NTU hay que presedimentar (SSWM); si la turbidez es habitual, que no pase de 25 NTU (Emergency WASH).
21. **Carga:** llena la maceta 2-3 veces al día sin tocar su interior con las manos.
22. **Sitio:** tapado, a la sombra, sobre un soporte de ≥ 30 cm, fuera del alcance de animales.
23. **Servir: solo por el grifo,** con vaso limpio; nunca manos ni cazos en el depósito.
24. **Desinfección final:** si el agua viene de río, charca o pozo abierto, o hay brotes de hepatitis o diarrea, añade cloro al agua filtrada (dosis en el artículo de cloro y yodo) o hiérvela.

Criterio de éxito: agua transparente, sin olor y fresca; el depósito solo se abre para limpiarlo. **Cálculo.** La OMS/WEDC (nota técnica 9) da 2,5-3 l/persona/día para beber y 7,5-15 l en total. Para 5 personas: 15 l/día de bebida y $\geq 37,5$ l/día contando cocina e higiene básica. El caudal de 1-2 l/h es el del filtro nuevo en la primera hora; en uso baja al bajar el nivel y al colmatarse, y queda en $\approx 0,5$ -1,5 l/h de media (**verificar**). Con agua de canal, van Halem vio que en 12 semanas todos sus filtros bajaron de 0,5 l/h. Así:

- **Agua clara** (≈ 1 l/h de media, maceta rellena 2-3 veces): 15 l en ≈ 15 h $\rightarrow$ **1 filtro** para la bebida de 5 personas.
- **Agua turbia** ($\approx 0,5$ l/h): 15 l piden ≈ 30 h $\rightarrow$ **2 filtros o presedimentación obligatoria.**
- Para $\approx 37,5$ l/día: 2-3 filtros, o un depósito de 20 l invertido encima de la maceta (variante de RDIC) que la mantiene llena y aprovecha la noche.

21. Limpiar la maceta (cuando el caudal baje claramente o cada 1-4 semanas con agua turbia).

20. Lávate las manos con jabón y tapa el depósito mientras tanto.
21. Levanta la maceta por el borde y apóyala por el borde sobre un barreño limpio, con el fondo en el aire, **sin tocar el fondo exterior.**
22. Frota el **interior** con cepillo de cerdas blandas y el agua sin filtrar: sin jabón ni lejía (taponan los poros o dejan sabor) y sin estropajo metálico ni arena (desgastan la pared y la plata).
23. Enjuaga con agua de la fuente, vacía y vuelve a colocar. No frotes el exterior; si hay que limpiarlo, usa agua filtrada o hervida y un paño reservado para eso.

Criterio de éxito: el interior recupera el color del barro y el caudal sube de forma apreciable. Según van Halem, el efecto es temporal y el caudal vuelve a caer con agua turbia.

22. Limpiar el depósito y el grifo (cada 1-3 meses, o si aparece limo o sabor).

20. Saca la maceta como en el paso 21 y vacía el depósito por el grifo.
21. Frota el depósito por dentro con agua con cloro: 15 ml (1 cucharada) de lejía al 5 % sin aditivos en 10 l de agua dan ≈ 75 mg/l, del orden de la desinfección de choque del artículo de cloro y yodo (≈ 55 mg/l, OMS/WEDC nota técnica 3). El CDC da para superficies 1 cucharada por galón (≈ 15 ml en 3,8 l, ≈ 200 mg/l con lejía al 5 %). Sin lejía, usa agua recién hervida.
22. Abre y cierra el grifo con esa agua dentro.
23. Aclara con agua clorada para beber o hervida (no solo filtrada) y seca boca abajo.

Criterio de éxito: ni capa viscosa al pasar el dedo ni olor a moho.

23. Vida útil y señales de rotura. Cambia la maceta con lo que ocurra antes:

- **Tiempo:** cada **2 años** (RDIC); Oyanedel-Craver y Smith dan una vida típica de 2-3 años. SSWM recomienda cada 1-2 años y Emergency WASH 6-12 meses con agua de mala calidad.
- **Rotura:** grieta visible, sonido rajado, desconchón en el borde, o caudal que de repente **sube** sin haberla limpiado.

- **Desgaste por limpieza:** tras muchos cepillados la pared adelgaza. Si al llenarla aparecen por fuera manchas húmedas que destacan antes que el resto, trátalo como fuga localizada (paso 12).
- **Agua filtrada turbia o con olor.**

Una maceta rota **no se repara** con barro, cemento ni cola: se retira. *Criterio de éxito:* golpe de nudillo con sonido claro y, justo después de limpiar, caudal de la primera hora (paso 11) **no superior a 2,5 l/h** ni al que tenía el filtro nuevo (anotado en su hoja).

F. Filtros de vela cerámica

24. **Qué son.** Cilindros de cerámica hueca con una boquilla roscada, de arcilla fina o tierra de diatomeas, con poros más finos que la maceta (del orden de 0,2-1 µm según fabricantes (**verificar**)), a veces con plata o núcleo de carbón. Se montan en **dos cubos superpuestos**:

24. La vela cuelga dentro del cubo superior y atraviesa su fondo con junta de goma y tuerca.

25. El agua entra de fuera hacia dentro de la vela y cae por la boquilla al cubo inferior, que lleva grifo.

Cada vela da ≈ 0,1-1 l/h (SSWM), así que se ponen 2-4. Su punto débil es **la junta**: si gotea, pasa agua sin filtrar. *Criterio de éxito del montaje:* con el cubo superior lleno y las velas sustituidas por un tapón ciego (o con la boquilla tapada por abajo), no gotea nada al cubo inferior en 1 h.

25. **Uso y limpieza de las velas.** Las primeras 2-3 cargas se desechan. Cuando el caudal caiga a la mitad:

24. Desenrosca la vela con las manos limpias, sujetándola por la boquilla.

25. Frota la superficie exterior con estropajo suave o cepillo bajo agua **filtrada o hervida**, sin mojar la boquilla por dentro, hasta que reaparezca el color original.

26. Vuelve a montarla.

Cámbiala si tiene grietas, si ha perdido grosor (algunos fabricantes dan un calibre de diámetro mínimo) o, si lleva carbón, cuando vuelva el mal sabor. Fabricar velas en local exige barro muy fino y homogéneo, colado en molde de escayola o prensado, y la misma cocción controlada: es más difícil que la maceta y conviene reservarlo a talleres con experiencia. *Criterio de éxito:* tras limpiar, el caudal vuelve a más del 80 % del inicial y el agua sale transparente.

G. Etapa de carbón en el filtro doméstico

La preparación del carbón granular (triturado a 0,5-2 mm, cribado, lavado y activación) está en Filtro lento de arena y biofiltro de carbón (p. 28). Aquí solo se explica cómo integrarlo.

26. **Montar un cubo de carbón antes de la cerámica (opción recomendada).** El carbón va **antes** para que la cerámica retenga después las bacterias que suelte su biopelícula. Una bolsa de carbón metida en la maceta no sirve: el agua sale por paredes y fondo sin atravesarla, y además tapa superficie filtrante.

26. **Cubo:** uno de plástico alimentario o barro, con el fondo perforado con agujeros de ≈ 3-5 mm, que se apoye firme sobre la boca del depósito o sobre dos listones cruzados, y gotee dentro de la maceta. La tapa del conjunto pasa al cubo.

27. **Lecho:** en el fondo, una tela de algodón tupida o 2-3 cm de grava fina lavada, y encima carbón granular lavado en un espesor de ≥ 10 cm (**verificar**), cubriendo todo el fondo de pared a pared.

28. **Volumen:** no cargues en el cubo más agua de la que cabe libre en la maceta (≤ 10 l con la maceta vacía), para que no rebose.

29. **Tiempo de contacto:** tiempo = volumen del lecho ÷ caudal por el lecho; apunta a ≥ 5 min (**verificar**). Ejemplo: cubo de 25 cm de diámetro con 10 cm de carbón → lecho de ≈ 4,9 l. Si 10 l tardan 10 min en salir (1 l/min), el tiempo es ≈ 5 min. Si salen más deprisa, tapa agujeros con tapones de madera o pon más carbón.

Criterio de éxito: el agua sale del cubo **solo por los agujeros**, después de atravesar el lecho (no corre por los bordes del cubo ni rebosa por encima), no caen granos negros a la maceta y la maceta no rebosa con una carga completa.

- **Opción secundaria, después de la cerámica:** cartucho de carbón en el grifo o cámara entre maceta y depósito. Da mejor sabor, pero el carbón queda **en el lado limpio** y cría bacterias. Úsala solo con desinfección posterior (hervido, o cloro añadido en el vaso y no en el depósito, porque el carbón lo quitaría) o cambiando el carbón a menudo.
- Una bolsa de carbón dentro del depósito o de la maceta solo mejora algo el sabor por contacto; no cuenta como etapa de tratamiento.

27. **Mantener el carbón.** Lava el carbón nuevo hasta que el agua salga clara, para que el polvo negro no tapone la cerámica. Cámbialo cuando vuelva el sabor u olor que quitaba, o cada 2-3 meses (**verificar**). El carbón agotado se regenera calentándolo (ver el artículo del biofiltro) o se tira. *Criterio de éxito:* agua sin olor a cloro, a moho ni a charca.

Verificación

De lo más sencillo a lo más exigente:

1. **A simple vista y con el olfato.** Un vaso de vidrio con agua filtrada y otro con agua de la fuente, contra fondo blanco. El filtrado debe ser **claramente más transparente**, sin partículas ni olor. Si está igual de turbio, hay grieta o paso lateral.
2. **Caudal mensual.** Con la maceta llena hasta el borde, mide los litros de la primera hora (paso 11) y anótalos en una hoja pegada al filtro. Si **baja**, toca limpiar. Si **sube** por encima de 2,5 l/h o por encima del caudal que tenía nuevo sin haberlo limpiado, o sube de golpe, probable grieta: retira la maceta.
3. **Prueba de sonido** en cada limpieza (paso 9).
4. **Prueba de presencia/ausencia de H₂S** (tiras o frascos con medio de cultivo) sobre 100 ml de agua filtrada, cada 1-3 meses. Un cambio a negro en 24-48 h a 25-35 °C indica contaminación fecal probable.
5. **Recuento de E. coli** (membrana filtrante o sustrato cromogénico): **0 UFC en 100 ml** de agua filtrada. Con agua de entrada ≥ 1000 UFC/100 ml, mide también la reducción: $\geq 99\%$ (2 LRV), mejor $\geq 99,9\%$.
6. **Químicos (con laboratorio):** arsénico < 10 µg/l en filtros nuevos de arcilla de origen dudoso. Plata: la OMS no fija valor guía, pero considera tolerable hasta 0,1 mg/l. En los ensayos de Oyanedel-Craver y Smith (2008) el agua salió por encima de 0,1 mg/l al principio y por debajo tras 200 min de uso continuo.

Ninguna de estas pruebas verifica la retención de virus. Esa la aporta la desinfección posterior.

Errores frecuentes

Síntoma	Causa probable	Solución
Caudal $> 2,5$ l/h en filtro nuevo (o 2,0-2,5 sin prueba bacteriológica)	Demasiado combustible, partícula gruesa o grieta	Descartar pieza; ajustar receta (-5 puntos de combustible o tamiz más fino)
Caudal < 1 l/h en filtro nuevo	Poco combustible, partícula muy fina, pared gruesa o sobrecocción	Subir combustible 5 puntos (sin bajar del 53 % de arcilla), pared más fina, bajar temperatura final
Caudales muy distintos en la misma hornada	Mezcla poco homogénea, grosor irregular, zonas frías del horno	Mezclar más tiempo; medir grosor; apuntar la posición de cada pieza en el horno
Piezas agrietadas al salir del horno	Secado incompleto o subida rápida por encima de 100 °C	Secar del todo; mantener 2 h a ≈ 100 °C
Núcleo negro, se raya o mancha la mano	Cocción insuficiente (aunque no se deshaga en agua)	No usar como filtro; alargar la cocción y comparar con anillos de referencia
Agua filtrada con sabor a barro semanas después	Cocción baja o arcilla con mucha materia orgánica	Retirar; mejorar cocción o cambiar de arcilla
Agua filtrada turbia	Grieta, holgura en el aro, agua que entra por el borde	Prueba de sonido y de fugas; sellar aro; cambiar maceta
Caudal que cae a menos de 0,5 l/h en semanas	Agua turbia que colmata los poros	Presedimentar; cepillar el interior; segundo filtro
Limo o mal olor en el depósito	Biopelícula por falta de plata, manos o cazos dentro	Limpieza con cloro (paso 22); servir solo por el grifo
Solución de plata amarillenta o con posos	Luz o agua con cloruros (grifo, pozo salobre)	Guardar en opaco; preparar con agua destilada o de lluvia
El carbón no quita el mal sabor	Carbón agotado o sin activar, lecho fino, agua que corre por los bordes	Cambiar o regenerar; lecho ≥ 10 cm de pared a pared; menos agujeros
Más bacterias tras añadir carbón en el grifo	Biopelícula en el carbón, en el lado limpio	Llevar el carbón antes de la cerámica o desinfectar después

Seguridad

- **Falsa seguridad: el riesgo más grave.** Un filtro agrietado, mal cocido o con holgura en el aro deja pasar agua contaminada con aspecto casi limpio. La diarrea, el cólera o la fiebre tifoidea pueden **matar**, sobre todo a niños pequeños. Mide el caudal y haz la prueba de sonido con regularidad. Con agua muy contaminada, durante brotes o para lactantes, desinfecta siempre después del filtro.
- **Virus.** Pasa una parte importante de los virus: hepatitis A y E, rotavirus, norovirus, poliovirus. La hepatitis E es especialmente peligrosa en embarazadas. En zonas con estos brotes, **cloro o hervido tras el filtro es obligatorio**.
- **Químicos que no retiene.** Ni la cerámica ni el carbón vegetal quitan de forma fiable arsénico, nitratos, flúor, sal ni metales pesados. Si la fuente es sospechosa (zonas con arsénico conocido, minas, campos abonados), el filtro no la vuelve segura.
- **Arsénico de la propia arcilla.** Algunas arcillas liberan arsénico durante semanas: no uses arcilla de zonas con arsénico si no puedes analizar, y si no hay alternativa desecha el agua inicial (paso 13).
- **Plomo del depósito.** Nunca uses loza vidriada tradicional de origen desconocido para guardar agua de beber: los vidriados de baja temperatura suelen llevar plomo y pueden soltarlo. Usa barro sin vidriar o vidriado que se sepa sin plomo. La madera, con cera de abejas o sin sellar, nunca pintada ni barnizada.
- **Polvo de arcilla (sílice cristalina).** Respirarlo durante meses o años causa **silicosis**, irreversible, y se asocia a cáncer de pulmón. Tritura y mezcla en seco al aire libre, con el viento a la espalda, con mascarilla (idealmente FFP2/FFP3 o N95; como mínimo tela húmeda de varias capas, mucho menos eficaz) y gafas. Humedece el suelo, barre en húmedo y no dejes a niños cerca.
- **Nitrato de plata.** Corrosivo y oxidante. En los ojos puede causar lesiones graves y ceguera; en la piel deja manchas negras durante semanas y quema si está concentrado. Ingerido es tóxico, y es muy tóxico para la vida acuática.
 - ▶ **Prevención:** guantes y gafas; no lo guardes junto a combustibles, madera ni papel; frasco opaco etiquetado, lejos de alimentos y de niños.
 - ▶ **Ojos:** lava con agua limpia **15 min** sin parar, con el párpado abierto, y busca atención médica.
 - ▶ **Piel:** lava con agua abundante. **Si se traga:** enjuaga la boca, da agua a sorbos, no provoques el vómito y busca atención médica.
 - ▶ **Restos:** no los tires a ríos ni pozos. Precipítalos con sal común (cloruro de plata, insoluble) y deja secar el poso en un recipiente cerrado.
- **Plata en el agua de bebida.** Con la dosis del paso 16 y desechando las primeras cargas, la plata queda por debajo de lo que preocupa a la OMS. Un error de dilución (disolver los 100 g directamente en el agua de trabajo) multiplica la dosis por 13-14. Tomar plata en exceso durante años causa **argiria**, coloración gris azulada permanente de la piel. No añadas plata "de más" ni bebas soluciones de plata coloidal.
- **Horno.** Quemaduras por piezas o cenizas: guantes gruesos, calzado cerrado y no descargar antes de 24 h. En espacios cerrados el humo lleva **monóxido de carbono**, que mata sin avisar: horno al aire libre o bajo tejado abierto, con chimenea alta y lejos de viviendas. Una pieza húmeda puede estallar: no te asomes a la mirilla durante la subida inicial.
- **Carga y aplastamiento.** Un bloque pesa 8 kg y un filtro lleno unos 16 kg: levanta con las piernas y entre dos si hace falta. Las prensas aplastan dedos: una sola persona acciona y nadie mete las manos en el molde.
- **Lejía.** Nunca la mezcles con vinagre, amoníaco ni otros limpiadores: desprende gases tóxicos. Ver el artículo de cloro y yodo.

Variantes

- **Con menos recursos (N0-N1 sin horno de tiro):**
 - ▶ *Cocción en hoguera o en hoyo.* No es fiable llegar a 850 °C y mantenerlos en toda la pieza (**verificar**): salen filtros blandos, con núcleo negro y caudal errático. Si no hay alternativa, cuece en hoyo cubierto con tiestos y mucha leña, aplica sin excepción las pruebas del anillo, del sonido y del caudal, y **trata el agua filtrada siempre como no potable**: el filtro solo clarifica y se hierve o clora después.
 - ▶ *Sin plata.* Ver paso 17: se compensa con desinfección posterior y limpieza más frecuente.
 - ▶ *Depósito sin plástico.* Tinaja de barro sin vidriar (bien cocida, lavada y tapada) o vidriada solo si el vidriado se sabe sin plomo. Nunca uses loza vidriada tradicional de origen desconocido para guardar agua de beber: puede soltar plomo. Tapa de madera y un caño de barro o de caña con tapón de madera como grifo. Sin grifo, un

cazo de mango largo reservado para ello que nunca toque el suelo; es peor, porque las manos acaban tocando el agua.

- *Sin tamices*. Criba con cesta de trama fina y tela de algodón como segundo tamiz; el caudal saldrá más variable, así que haz más piezas de prueba.
- **Con más recursos (N2-N4):**
 - Prensa hidráulica y molde metálico de dos piezas (RDIC, Potters for Peace): pared idéntica en todas las piezas. Molino de martillos y amasadora mecánica.
 - Conos Orton 012-014 o termopar. Con termopar se puede cocer con meseta: Oyanedel-Craver y Smith cocieron a 900 °C con 3 h de meseta (pág. 928).
 - Regla en T calibrada para medir el caudal de decenas de filtros a la vez.
 - Nitrato de plata a partir de plata metálica y ácido nítrico (N3; desprende NO₂; solo al aire libre o con campana; es tema de química, no se detalla aquí).
 - Laboratorio propio de *E. coli* para liberar lotes y analizar arsénico.
 - Óxidos de hierro (laterita, goethita) en la mezcla para intentar adsorber virus: RDIC lo probó y lo abandonó porque no pudo confirmar el efecto.
 - Velas industriales con plata y núcleo de carbón. Para virus, ultrafiltración con poro $\leq 0,02 \mu\text{m}$ ($\approx 20 \text{ nm}$) o con certificación de reducción de virus según la clasificación de la OMS para tratamiento doméstico (N4). Las fibras de 0,1-0,2 μm , igual que la cerámica, necesitan desinfección posterior contra virus.
- **Escalado:**
 - *Familia*: un filtro de maceta basta para la bebida de 5 personas con agua clara; dos con agua turbia o si también se cocina con ella (cálculo del paso 20). Maceta de repuesto en casa.
 - *Aldea*: un taller de 3-4 personas con prensa, 1 horno de ≈ 100 piezas y un soporte para pruebas de caudal abastece a cientos de familias al año. Lo que decide el éxito es la **calidad constante**: prueba de caudal a cada pieza, registro por lote y enseñanza de uso a cada familia; RDIC insiste en que la formación importa tanto como la fabricación. Venderlo a precio de coste favoreció en Camboya la compra de repuestos.
 - *Escuelas y centros de salud*: depósito de 20 l invertido sobre la maceta para tener ≈ 30 l por carga, o baterías de 4-6 filtros en paralelo.
 - *Ciudad*: el filtro doméstico no escala a una red. Para una población grande se usa tratamiento centralizado (coagulación, filtración rápida o lenta en arena y cloración) y el filtro cerámico queda como protección en el punto de consumo cuando la red no es fiable.

Fuentes

- Hagan, J.M.; Harley, N.; Hughes, R.; Chouhan, A.; Pointing, D.; Sampson, M.; Smith, K.; Soam, V. *Resource Development International – Cambodia Ceramic Water Filter Handbook*, v1.3. RDIC / Engineers Without Borders Australia, Phnom Penh, 2009-2010. Tamaño de poro (págs. 8-9), mezcla (4.2), cubos (4.3), prensado (4.4), secado y cocción con conos Orton 012/014 (4.5, págs. 41 y 44), prueba de caudal (4.6, pág. 46), plata (4.7, págs. 48-49), embalaje (4.8), seguridad laboral (5.1). <http://potterswithoutborders.com/wp-content/uploads/2011/12/RDIC-Ceramic-Filter-Manual.pdf>
- Ceramics Manufacturing Working Group. *Best Practice Recommendations for Local Manufacturing of Ceramic Pot Filters for Household Water Treatment*, 1.ª ed., CDC, 2011. Intervalo de caudal de 1-3 l/h, consultado de forma indirecta.
- Oyanedel-Craver, V.A.; Smith, J.A. *Environ. Sci. Technol.* 42(3): 927-933, 2008. Caudal de diseño de Potters for Peace (1-2 l/h), poros de 0,02-15 μm , cocción a 900 °C con 3 h de meseta, vida útil de 2-3 años, dosis de plata y plata en el efluente.
- van Halem, D. Tesis de máster, TU Delft, 2006. LRV de *E. coli* (4-7) y de MS2 (0,5-3), filtros sin plata, plata coloidal (2 ml al 3,2 % en 250 ml), lixiviación de arsénico, poro medio por burbuja y caída de caudal.
- van der Laan, H. et al. «High flow ceramic pot filters». *Water Research*, 2017. Caudal inicial frente a caudal en uso y retención.
- «Arsenic leaching from ceramic water filters». *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 4(2), 2018. Arsénico liberado por filtro ($\approx 43,5 \text{ mg}$; 80 % en los primeros 100 l) y efecto del lavado.
- Lantagne, D.S. *Investigation of the Potters for Peace Colloidal Silver Impregnated Ceramic Filter. Report 1*. Alethia Environmental para USAID, 2001. Citado a través de van Halem y RDIC.
- Brown, J. (2007), citado por RDIC (pág. 8): rendimiento en campo de filtros con y sin plata.
- OMS. *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4.ª ed. con 1.ª y 2.ª adendas, 2022, tabla 7.8.

- OMS. *Evaluating household water treatment options*, 2011.
- OMS. *Heterotrophic Plate Counts and Drinking-water Safety*, 2003: crecimiento bacteriano en carbón.
- OMS / WEDC. Nota técnica 9, «How much water is needed in emergencies»: 2,5-3 l para beber, 7,5-15 l/día.
- CDC. Limpieza y desinfección con lejía: 1 cucharada por galón para superficies.
- SSWM. Ficha «Colloidal Silver Filter»: caudal de vela (0,1-1 l/h), sustitución cada 1-2 años, turbidez máxima de 50 NTU.
- Emergency WASH Compendium. «H.3 Ceramic Filtration»: turbidez (25/50 NTU) y vida de elementos.
- Potters for Peace, «Ceramic Water Filter Project», y Engineering for Change, «Silver Filter»: medidas de la maceta, cocción a $\approx 860-900$ °C, plata coloidal (1-2 ml en 250 ml) y producción de un taller.
- Potters Without Borders. «Study on the flow rate of ceramic filters», 2013: arcilla ≥ 53 % y umbral de 1,7 l/h.

Relacionados: Hervido del agua (p. 3) Filtro lento de arena y biofiltro de carbón (p. 28) Desinfección química del agua con cloro y yodo (p. 18) Desinfección solar (SODIS) (p. 9)