

## CARBÓN ACTIVO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA: PRINCIPIOS Y FUNCIONAMIENTO

### INTRODUCCIÓN

El carbón activo es uno de los materiales filtrantes más utilizados y eficaces en el tratamiento del agua potable. Su capacidad para eliminar cloro, compuestos orgánicos responsables de olores y sabores, pesticidas, subproductos de desinfección y numerosos contaminantes se debe a una característica extraordinaria: una superficie interna gigantesca concentrada en una pequeña partícula de apenas unos milímetros.

Sin embargo, esta capacidad no es una propiedad natural del carbón. Un carbón recién obtenido a partir de madera, cáscara de coco o carbón mineral posee una eficacia limitada. Solo después de someterlo a un proceso de activación adquiere la compleja estructura interna que lo convierte en un material de altísimo rendimiento.

Pero ¿qué significa realmente que un carbón esté "activado"? ¿Se le añaden sustancias químicas? ¿Se modifica su composición? ¿Por qué un simple trozo de carbón puede llegar a presentar más de 1.000 metros cuadrados de superficie por cada gramo, una extensión comparable a varias pistas de tenis?

La respuesta se encuentra en un proceso de ingeniería térmica de gran precisión. Mediante temperaturas muy elevadas y una reacción cuidadosamente controlada con vapor de agua o gases oxidantes, se generan millones de poros microscópicos que transforman completamente la estructura del carbón. El resultado es un auténtico laberinto tridimensional capaz de retener moléculas contaminantes y favorecer reacciones químicas en su superficie.

En este artículo analizaremos, de forma clara y rigurosa, cómo se fabrica el carbón activo, qué ocurre durante su proceso de activación, por qué aparecen los llamados *centros activos* y cómo esta transformación explica su extraordinaria eficacia en la purificación del agua. Comprender este proceso permite entender por qué el carbón activo sigue siendo, décadas después de su desarrollo industrial, uno de los materiales más eficientes y versátiles para el tratamiento del agua potable.

### 1.- PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO

El carbón activo no se encuentra de forma natural. Es el resultado de un proceso de fabricación cuidadosamente controlado en el que una materia prima rica en carbono se transforma, mediante altas temperaturas, en un material con una estructura interna extraordinariamente porosa. Aunque existen diferentes métodos de producción, todos siguen el mismo principio: convertir un material orgánico en un carbón extremadamente poroso, con una enorme superficie interna capaz de adsorber contaminantes y favorecer determinadas reacciones químicas.

El proceso de fabricación puede dividirse en dos grandes etapas: la carbonización y la activación.

### 1.1 Selección de la materia prima

Todo comienza con la elección de un material rico en carbono. Las materias primas más utilizadas son:

- Cáscara de coco.
- Madera.
- Carbón mineral.
- Turba.
- Cáscaras de frutos secos y otros residuos vegetales.

Cada una aporta características diferentes al carbón activo final. Por ejemplo, la cáscara de coco, debido a su elevada dureza y densidad, produce un carbón con una gran proporción de microporos, ideal para el tratamiento de agua potable y la eliminación de contaminantes de pequeño tamaño, como el cloro libre y numerosos compuestos orgánicos.

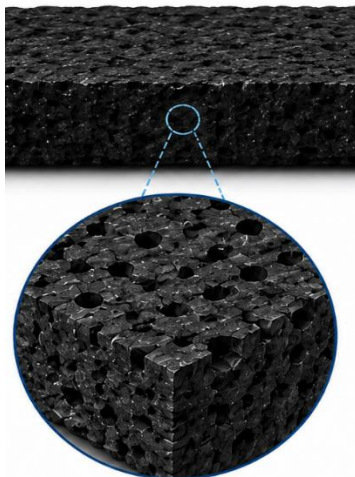
### 1.2 Carbonización

Una vez seleccionada la materia prima, esta se introduce en hornos especiales donde se calienta entre 400 y 700 °C en ausencia, o con una cantidad muy limitada, de oxígeno. La falta de oxígeno es fundamental. Si el material se calentara en presencia de aire, simplemente ardería y se transformaría en dióxido de carbono y cenizas. Al evitar la combustión, solo se eliminan los componentes más volátiles.

Durante esta etapa se producen varios cambios importantes:

- Se evapora el agua contenida en el material y se eliminan aceites, resinas y otras sustancias volátiles.
- Desaparecen gran parte del hidrógeno, el oxígeno y otros elementos presentes en la materia prima.
- La proporción de carbono aumenta progresivamente.

Al finalizar la carbonización se obtiene un carbón relativamente puro y resistente, pero todavía con una superficie interna pequeña y una capacidad de adsorción limitada.

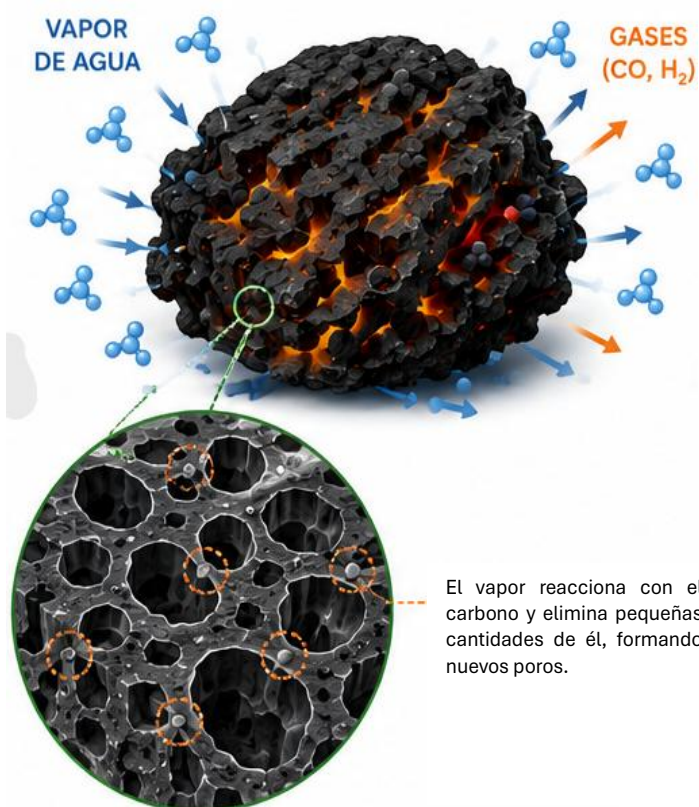


*Después de la carbonización queda una estructura compacta con pocos poros o cavidades, una superficie interna muy limitada y una baja capacidad de adsorción.*

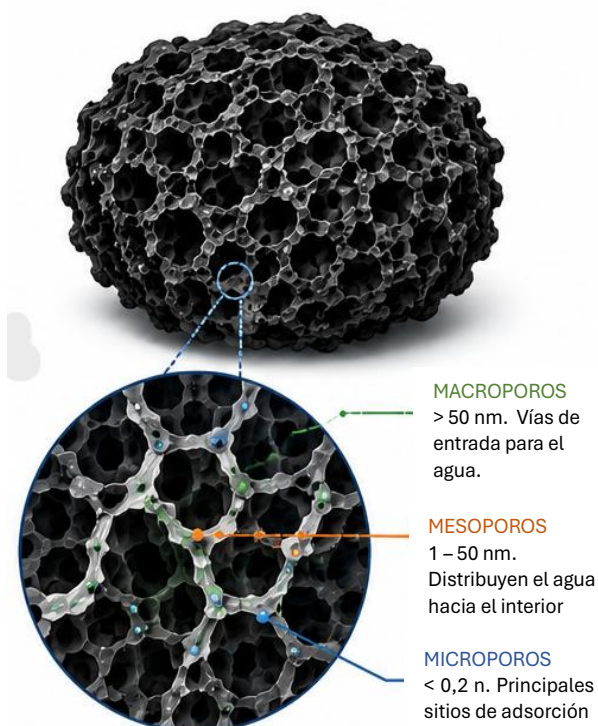
### 1.3 Activación

La segunda etapa es la que convierte ese carbón en carbón activo. El carbón carbonizado vuelve a introducirse en hornos, donde se somete a temperaturas comprendidas entre 800 y 1.000 °C. En ese momento se hace pasar vapor de agua —o, en algunos procesos, dióxido de carbono— a través del material. Estos gases reaccionan lentamente con el carbono y eliminan pequeñas cantidades de él de forma controlada. Lejos de deteriorar el material, esta reacción va excavando millones de cavidades microscópicas en su interior, creando una compleja red de microporos, mesoporos y macroporos interconectados. El carbón mantiene prácticamente su tamaño exterior, pero su superficie interna aumenta miles de veces.

#### Ataque del vapor de agua a 800–1000 °C



#### Después de la activación



#### ESTRUCTURA ALTAMENTE POROSA

- Red tridimensional de macro, meso y microporos.
- Superficie interna muy elevada (hasta >1500 m<sup>2</sup>/g).
- Máxima capacidad de adsorción y reacción.

#### 1.4 Lavado y acondicionamiento

Una vez finalizada la activación, el carbón puede someterse a diferentes tratamientos según la aplicación a la que vaya destinado. En muchos casos se realiza un lavado para eliminar restos minerales o cenizas procedentes del proceso de fabricación. Posteriormente se seca, se clasifica por tamaño y se adapta al formato comercial deseado.

Puede presentarse como:

- Carbón activo granular (GAC).
- Carbón activo en bloque (CTO).
- Carbón activo en polvo (PAC).
- Fibras de carbón activo u otras configuraciones especiales.

Cada formato está diseñado para aplicaciones concretas, aunque todos conservan la misma estructura porosa generada durante la activación.

## 2.- TIPOS DE CARBÓN ACTIVO Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

No todos los carbones activos son iguales. Aunque todos se basan en el mismo principio — una estructura de carbono extremadamente porosa y con una elevada superficie interna —, sus propiedades pueden variar considerablemente dependiendo de la materia prima utilizada, el proceso de activación y la distribución del tamaño de sus poros. Estas diferencias determinan qué moléculas puede adsorber con mayor facilidad, su comportamiento frente al cloro, su resistencia mecánica y, en definitiva, para qué aplicaciones resulta más adecuado.

### 2.1. Carbón activo de cáscara de coco

La cáscara de coco es una materia prima especialmente interesante para fabricar carbón activo debido a su elevada dureza y densidad. Durante la activación desarrolla principalmente una estructura rica en **microporos**, es decir, poros extremadamente pequeños. Sus características principales son:

- Elevada proporción de microporos.
- Gran superficie específica.
- Alta dureza y resistencia mecánica.
- Baja generación de finos.
- Buen comportamiento en aplicaciones con agua potable.
- Buena capacidad de decoloración.
- Especialmente eficaz frente a numerosas moléculas orgánicas de pequeño tamaño.

Por estas características, el carbón de coco es ampliamente utilizado en filtros domésticos, cartuchos GAC y CTO, equipos de ósmosis inversa y sistemas de tratamiento de agua potable. Su elevada microporosidad proporciona una enorme superficie interna, aunque esto no significa que sea automáticamente el mejor carbón para cualquier contaminante.

## 2.2. Carbón activo de madera

El carbón activo fabricado a partir de madera suele desarrollar una estructura con una proporción importante de mesoporos y macroporos. Esto facilita la entrada y difusión de moléculas relativamente grandes hacia el interior del carbón. Sus principales características son:

- Estructura porosa más abierta.
- Mayor presencia de mesoporos.
- Buena accesibilidad para moléculas de mayor tamaño.
- Menor densidad que muchos carbones de coco o minerales.
- Buena capacidad para adsorber determinados compuestos orgánicos de mayor tamaño.

Por esta razón se utiliza en numerosas aplicaciones industriales, procesos de purificación, decoloración y tratamiento de líquidos que contienen moléculas orgánicas relativamente grandes.

## 2.3. Carbón activo mineral

Se fabrica a partir de distintos tipos de carbón mineral, especialmente carbones bituminosos. Su estructura suele presentar una distribución de poros más amplia que el carbón de coco, combinando microporos y mesoporos. Entre sus principales características destacan:

- Buena resistencia mecánica.
- Distribución equilibrada de tamaños de poro.
- Buena capacidad de adsorción para numerosos contaminantes.
- Adecuado para tratamientos generales de agua.
- Buena capacidad para trabajar con mezclas de contaminantes de diferentes tamaños moleculares.

Es muy utilizado en instalaciones industriales y grandes sistemas de tratamiento de agua.

## 2.4. Carbón activo de lignito

El lignito es un carbón mineral relativamente joven geológicamente y con características diferentes de los carbones bituminosos. Después de su activación suele presentar una estructura relativamente abierta, con una proporción importante de poros de mayor tamaño. Esto favorece el tratamiento de aguas que contienen moléculas orgánicas relativamente grandes. Generalmente presenta:

- Mayor proporción de mesoporos y macroporos.
- Buena accesibilidad interna.
- Menor densidad y dureza que el carbón de coco
- Buena capacidad para determinados contaminantes orgánicos de gran tamaño.

### 3.- CLASIFICACIÓN SEGÚN SU FORMA

Además de clasificarse por su materia prima, el carbón activo puede presentarse en diferentes formatos.

#### 3.1. Carbón activo granular - GAC

Está formado por partículas o gránulos de carbón activo. El agua circula entre las partículas y penetra progresivamente en su estructura porosa.

Se caracteriza por:

- Buena capacidad de adsorción.
- Pérdida de carga relativamente reducida.
- Posibilidad de utilizar diferentes granulometrías.
- Amplio uso en filtros, depósitos y cartuchos.

Es uno de los formatos más utilizados en tratamiento de agua.

#### 3.2. Carbón activo en polvo - PAC

Está formado por partículas extremadamente pequeñas. Su reducido tamaño proporciona una elevada velocidad de contacto y permite dispersarlo directamente en el agua durante determinados procesos de tratamiento. Se utiliza principalmente en plantas de tratamiento y procesos industriales, donde posteriormente el carbón debe separarse del agua.

#### 3.3. Carbón activo en bloque - CTO

En realidad, CTO no identifica una materia prima diferente, sino una configuración del carbón activo. El carbón activo finamente pulverizado se mezcla normalmente con un aglutinante y se comprime o extruye formando un bloque sólido y poroso. Esta estructura obliga al agua a atravesar una red mucho más uniforme y controlada.

Un bloque CTO puede proporcionar simultáneamente:

- Reducción de cloro.
- Adsorción de determinados compuestos orgánicos.
- Retención de partículas.
- Mayor uniformidad del flujo.
- Menor posibilidad de formación de canales preferenciales que en un lecho granular mal distribuido.

Por ello, los bloques de carbón son ampliamente utilizados en equipos domésticos y especialmente como pretratamiento o postratamiento en sistemas de ósmosis inversa.

#### 4. COMO ACTUA EL CARBÓN ACTIVO EN LA REDUCCIÓN DEL CLORO LIBRE

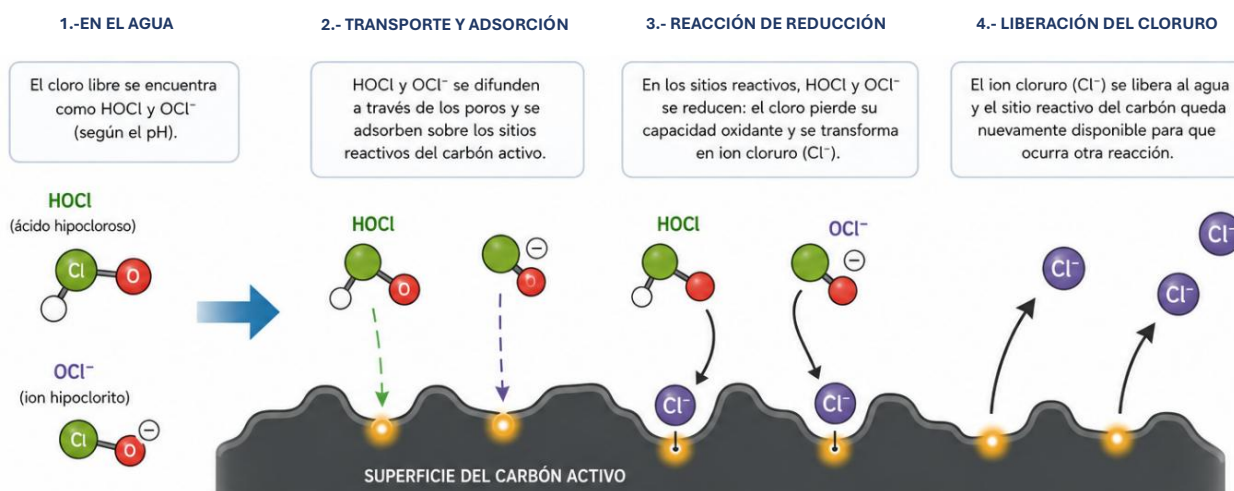
Una de las aplicaciones más conocidas del carbón activo en el tratamiento del agua es la reducción del cloro libre. Sin embargo, es frecuente explicar este proceso diciendo simplemente que el carbón “atrapa” o “adsorbe” el cloro en sus poros. Esta explicación no es del todo correcta. El carbón activo puede adsorber una gran cantidad de sustancias, especialmente determinados compuestos orgánicos, que quedan retenidos sobre su enorme superficie interna. En el caso del cloro libre, el mecanismo principal es diferente: el cloro reacciona químicamente con la superficie del carbón y se transforma en una especie que ya no tiene capacidad desinfectante.

Cuando se añade cloro al agua, este da lugar principalmente a ácido hipocloroso ( $\text{HOCl}$ ) y ion hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ). La proporción entre ambos depende fundamentalmente del pH del agua. A valores de pH más bajos predomina el ácido hipocloroso, mientras que al aumentar el pH aumenta progresivamente la proporción de hipoclorito. Ambas especies constituyen lo que habitualmente denominamos cloro libre residual. Cuando esta agua atraviesa un filtro de carbón activo, penetra por la extensa red de poros desarrollada durante la activación. El objetivo de esta porosidad no es únicamente “guardar” sustancias, sino proporcionar una superficie de contacto extraordinariamente grande. Dependiendo de sus características, un solo gramo de carbón activo puede disponer de centenares o incluso más de  $1.000 \text{ m}^2$  de superficie interna. Es precisamente sobre esta superficie donde tiene lugar la reducción del cloro.

El ácido hipocloroso y el hipoclorito son sustancias oxidantes. Cuando alcanzan determinadas zonas reactivas de la superficie del carbón se producen reacciones de oxidación-reducción en las que el cloro libre pierde su capacidad oxidante y se transforma principalmente en ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ). De forma muy simplificada podemos visualizar el proceso así:

**Cloro libre ( $\text{HOCl}$  /  $\text{OCl}^-$ )  $\rightarrow$  contacto con carbón activo  $\rightarrow$  reacción superficial  $\rightarrow$   $\text{Cl}^-$**

Esto significa que el cloro que desaparece del agua no queda necesariamente acumulado dentro del carbón. Después de la reacción, el cloruro formado permanece mayoritariamente disuelto y continúa circulando con el agua.

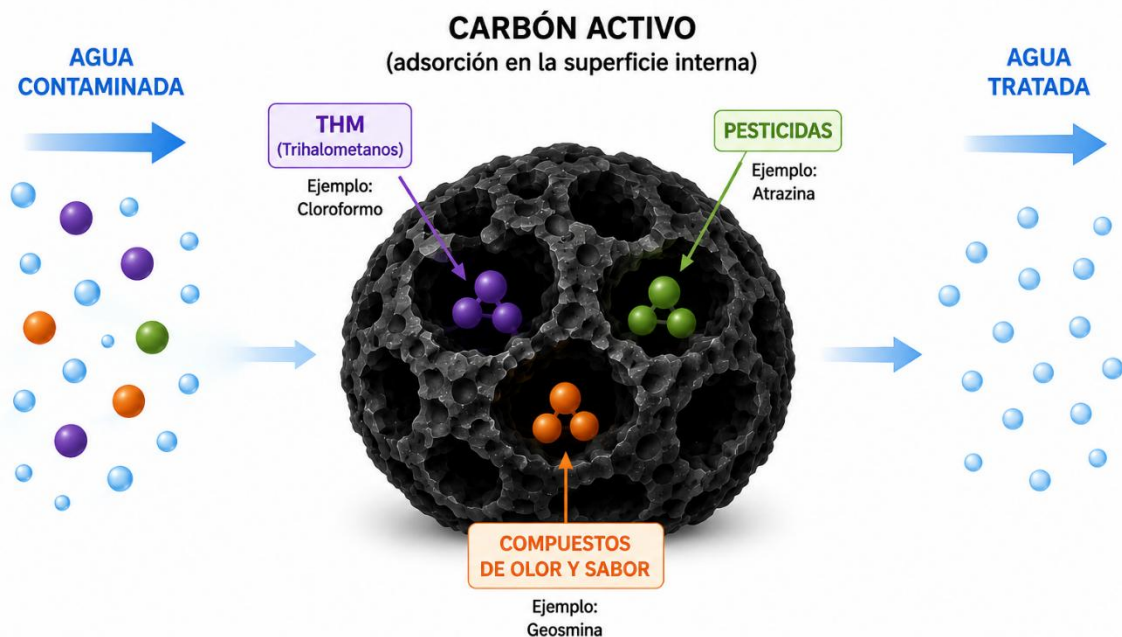


## 5. COMO ACTUA EL CARBÓN ACTIVO EN PRESENCIA DE OTROS CONTAMINANTES

Cuando el carbón activo elimina compuestos como trihalometanos (THM), determinados pesticidas o sustancias responsables de olores y sabores, el mecanismo principal es la adsorción. A diferencia del cloro libre, estos contaminantes generalmente no necesitan ser destruidos o transformados químicamente. Las moléculas pasan del agua a la enorme superficie interna del carbón y quedan retenidas sobre las paredes de sus poros.

Pero ¿por qué una molécula que está disuelta en el agua decide abandonar el agua y quedarse sobre el carbón?

La respuesta está en la afinidad entre la molécula contaminante y la superficie del carbón activo. El carbón presenta una superficie mayoritariamente carbonosa y relativamente hidrofóbica. Muchos contaminantes orgánicos tienen también carácter hidrofóbico, es decir, presentan poca afinidad por permanecer disueltos en el agua. Cuando estas moléculas encuentran la superficie del carbón, pueden establecer interacciones intermoleculares que hacen energéticamente favorable su permanencia sobre ella.



## 6. PROCESO DE AGOTAMIENTO DEL CARBÓN ACTIVO

El carbón activo no puede trabajar indefinidamente. A medida que pasa agua por el filtro, su capacidad para eliminar cloro y retener otros contaminantes va disminuyendo. Sin embargo, el carbón no se agota de la misma manera frente al cloro que frente a los contaminantes que adsorbe.

### 6.1. Cuando elimina cloro

El cloro libre llega a la superficie del carbón y reacciona con ella, transformándose principalmente en **ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ )**. El cloro, por tanto, no queda almacenado dentro del carbón, sino que se

transforma y continúa disuelto en el agua en forma de cloruro. Con el paso del tiempo y de los litros tratados, la superficie del carbón va cambiando y perdiendo capacidad para realizar esta reacción.

Por tanto, en la decoloración es más correcto hablar de agotamiento de la capacidad reactiva del carbón que de saturación por acumulación de cloro.

## 6.2. Cuando retiene otros contaminantes

Con los THM, pesticidas y compuestos responsables de olores y sabores sucede algo diferente. Estas moléculas penetran en los poros y quedan adsorbidas sobre la enorme superficie interna del carbón. Al principio existe mucha superficie disponible y el carbón puede retener una gran cantidad de contaminantes. Pero cada molécula retenida ocupa una parte de esa superficie. Finalmente queda poca superficie disponible y algunos contaminantes empiezan a atravesar el filtro sin ser retenidos. Haciendo una comparación muy sencilla, podemos imaginar el carbón activo como un enorme aparcamiento microscópico. Los contaminantes orgánicos son como coches que entran y ocupan plazas. Cuando prácticamente todas las plazas adecuadas están ocupadas, el carbón está saturado y los nuevos contaminantes continúan su camino. Con el cloro ocurre algo diferente. El cloro no aparca. Llega a la superficie, reacciona con ella, se transforma principalmente en cloruro y continúa con el agua. Pero cada reacción va modificando progresivamente esa superficie hasta que su capacidad de decoloración disminuye. En un filtro real, ambos procesos ocurren al mismo tiempo. Por eso, con el uso, el carbón pierde progresivamente tanto capacidad de decoloración como capacidad de adsorción, hasta que llega el momento de sustituirlo.

## 7.- FACTORES QUE DETERMINAN LA EFICACIA DEL CARBÓN ACTIVO

**7.1. Influencia del tiempo de contacto:** El tiempo de contacto es uno de los factores más importantes para determinar la eficacia del carbón activo. Para que el carbón pueda actuar, el agua debe permanecer el tiempo suficiente en contacto con su superficie interna. Cuando el agua circula demasiado rápido, las moléculas contaminantes tienen menos tiempo para penetrar en los poros y quedar adsorbidas, y el cloro dispone también de menos tiempo para reaccionar con la superficie del carbón.

**7.2. Influencia del tamaño de partícula:** El tamaño de las partículas de carbón activo influye directamente en la velocidad con la que los contaminantes pueden llegar hasta su superficie interna. Cuanto más pequeña es la partícula, menor es la distancia que deben recorrer las moléculas para penetrar en los poros y alcanzar las zonas de adsorción, por lo que generalmente aumenta la velocidad del proceso. Sin embargo, reducir demasiado el tamaño de partícula también aumenta la pérdida de carga y dificulta el paso del agua. Por ello, el tamaño adecuado debe buscar un equilibrio entre eficacia de adsorción, caudal y pérdida de presión.

**7.3. Influencia de la superficie específica:** La superficie específica indica cuánta superficie interna tiene el carbón activo por cada gramo de material y se expresa normalmente en  $\text{m}^2/\text{g}$ . Gracias a sus millones de poros, un carbón activo puede superar fácilmente los 1.000  $\text{m}^2$  por gramo. Sin embargo, tener más superficie no significa necesariamente tener un carbón mejor. Esa superficie debe encontrarse en poros accesibles y con un tamaño adecuado para las moléculas que se quieren eliminar. Por ello, tan importante como conocer los  $\text{m}^2/\text{g}$  es conocer cómo está distribuida esa

superficie entre microporos, mesoporos y macroporos. Un carbón será más eficaz cuando su estructura porosa sea adecuada para los contaminantes que debe tratar.

**7.4. Influencia del pH:** El pH del agua puede modificar la eficacia del carbón activo porque afecta tanto a la carga eléctrica de su superficie como a la forma química y carga de determinados contaminantes. Al variar el pH, algunas moléculas pueden pasar de ser neutras a estar cargadas positiva o negativamente. Al mismo tiempo, la superficie del carbón también puede cambiar su carga, haciendo que la atracción entre ambos aumente o disminuya.

El pH también es especialmente importante en la cloración, ya que determina la proporción entre ácido hipocloroso  $\text{HOCl}$  e ion hipoclorito  $\text{OCl}^-$ , que presentan comportamientos diferentes frente a la superficie del carbón. Por tanto, un mismo carbón puede ofrecer rendimientos diferentes dependiendo del pH del agua que está tratando.

**7.4. Competencia entre contaminantes:** En el agua real existen muchos contaminantes simultáneamente, y todos pueden intentar acceder a la superficie y a los poros del carbón activo. Por ello, las diferentes moléculas pueden competir entre sí por los sitios disponibles de adsorción. El carbón no retiene todas las sustancias con la misma facilidad. Las moléculas con mayor afinidad por su superficie y con un tamaño adecuado para acceder a sus poros pueden ser adsorbidas preferentemente frente a otras.

Además, sustancias presentes en concentraciones elevadas, como la materia orgánica natural, pueden ocupar una parte importante de la superficie o bloquear el acceso a determinados poros, reduciendo la capacidad del carbón para retener otros contaminantes presentes en concentraciones mucho menores. Por esta razón, el rendimiento de un carbón activo en agua real puede ser diferente al obtenido en ensayos realizados con un único contaminante.

**7.5.- Zonas de transferencia de masa y punto de ruptura:** La zona de transferencia de masa es la parte del lecho de carbón activo donde, en cada momento, se está produciendo principalmente la adsorción de los contaminantes. Cuando el agua entra en contacto con carbón nuevo, las primeras capas comienzan a retener los contaminantes. Con el paso del agua, estas capas van perdiendo capacidad y la zona donde se produce la adsorción se desplaza hacia capas de carbón que todavía conservan capacidad de retención. A medida que aumenta el volumen de agua tratado, esta zona activa avanza progresivamente a través del lecho, en la dirección del flujo. Cuando la zona de transferencia de masa alcanza la salida del filtro, el contaminante comienza a aparecer en el agua tratada. Este momento se denomina punto de ruptura o *breakthrough*.

El punto de ruptura no significa necesariamente que todo el carbón esté completamente saturado, sino que el filtro ya no consigue mantener el nivel de eliminación establecido. Por este motivo, el filtro debe sustituirse antes de alcanzar una pérdida total de capacidad, especialmente cuando la concentración del contaminante a la salida debe mantenerse por debajo de un valor determinado. Por tanto, el carbón activo no se satura todo al mismo tiempo: el agotamiento avanza progresivamente desde la entrada hacia la salida del filtro.

**7.6. Influencia de la capacidad y la velocidad de adsorción:** Capacidad de adsorción indica cuánta cantidad de contaminante puede retener el carbón antes de alcanzar su capacidad útil. Depende principalmente de la superficie disponible, la porosidad del carbón y de la afinidad entre el contaminante y el carbón.

La velocidad de adsorción indica con qué rapidez el contaminante pasa del agua a la superficie y a los poros del carbón. Está muy relacionada con el tiempo de contacto, el tamaño de partícula y la facilidad con la que el contaminante puede difundirse hasta los poros.

Una forma sencilla de distinguirlos es:

*Capacidad = cuánto puede retener.*  
*Velocidad = cuánto tarda en retenerlo.*

Por ejemplo, un carbón puede tener mucha capacidad de adsorción, pero si el agua circula demasiado rápido y el tiempo de contacto es insuficiente, puede no aprovecharse toda esa capacidad porque los contaminantes no tienen tiempo suficiente para alcanzar los sitios de adsorción.

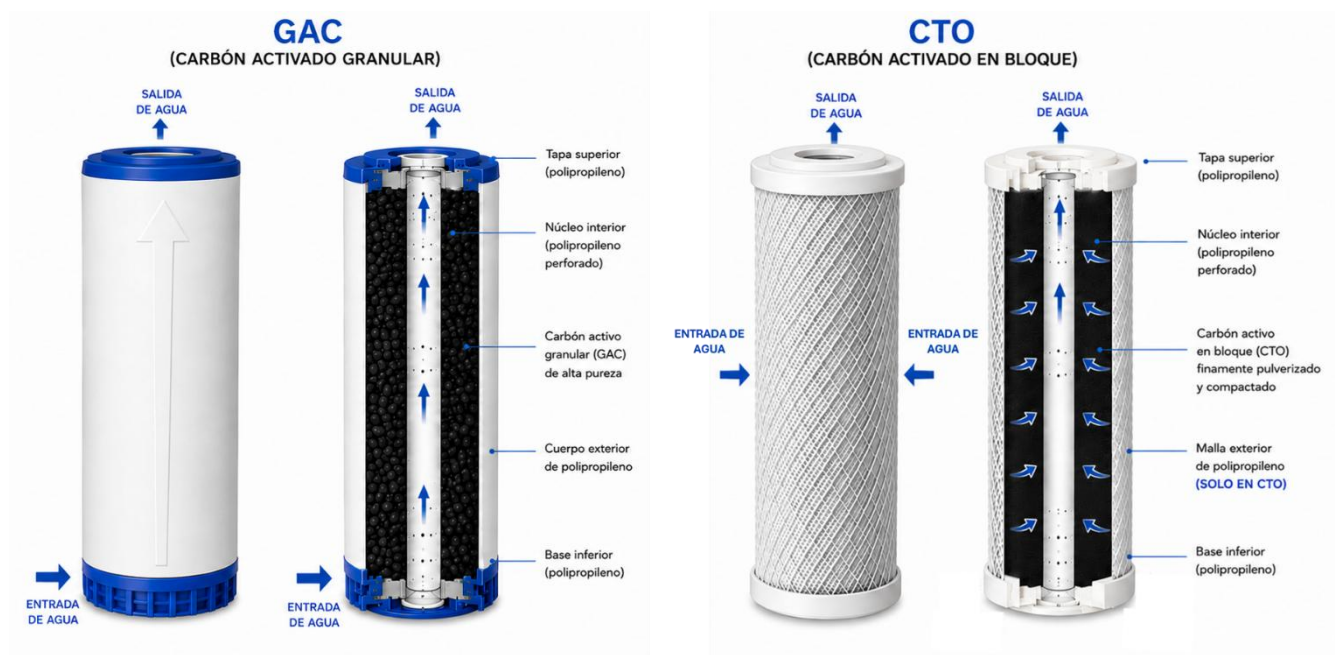
**7.7. Influencia del origen del carbón activo:** El carbón activo de cáscara de coco se considera un material de alta calidad, pero esto no significa que sea siempre más eficaz que un carbón obtenido de otras materias primas. Su rendimiento depende principalmente de qué contaminante se quiere eliminar y de la estructura de poros que presenta el carbón. El carbón de coco suele tener una elevada proporción de microporos, muy adecuados para adsorber moléculas pequeñas. Sin embargo, otros carbones, como los obtenidos a partir de carbón mineral o madera, pueden presentar una mayor proporción de mesoporos y macroporos, que facilitan la entrada y adsorción de moléculas de mayor tamaño. Por tanto, el origen del carbón no determina por sí solo su eficacia. Lo importante es que su porosidad, superficie y características químicas sean adecuadas para los contaminantes que se desean eliminar.

## 8.- COMPARACIÓN ENTRE CARBÓN ACTIVO GRANULAR (GAC) Y CARBÓN ACTIVO EN BLOQUE (CTO) EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS

Tanto el carbón activo granular (GAC) como el carbón activo en bloque (CTO) actúan mediante los mismos principios de adsorción y decoloración. La principal diferencia está en su estructura y en la forma en que el agua circula a través del carbón.

En el GAC, el carbón está formado por gránulos sueltos y el agua circula entre ellos. Esta estructura presenta generalmente menor resistencia al paso del agua y menor pérdida de carga, aunque existe mayor posibilidad de que se formen caminos preferenciales y parte del carbón se aproveche menos.

En el CTO, el carbón está finamente triturado y compactado formando un bloque poroso que el agua debe atravesar. Esto proporciona un contacto más uniforme con el carbón, reduce el riesgo de canalización y permite combinar la acción del carbón activo con una filtración más fina de partículas, aunque generalmente produce una mayor pérdida de carga.



Para la eliminación de cloro en tratamiento de aguas, ambos pueden ser muy eficaces si están correctamente dimensionados. El CTO puede favorecer un contacto más uniforme y una transferencia más rápida, mientras que en el GAC resulta especialmente importante disponer de suficiente tiempo de contacto y una buena distribución del flujo.

Para contaminantes orgánicos disueltos, pesticidas, THM y compuestos responsables de olores y sabores, no puede afirmarse que GAC o CTO sea siempre mejor. La eficacia depende principalmente del tipo y cantidad de carbón, su estructura de poros, la afinidad con el contaminante y el tiempo de contacto. En estos casos, las características del carbón pueden ser más importantes que su presentación como GAC o CTO.

Por tanto, GAC y CTO no son mejores o peores entre sí, sino diferentes. El GAC resulta adecuado cuando se busca principalmente adsorción o decloración con baja pérdida de carga, mientras que el CTO es especialmente interesante cuando, además, se requiere un flujo más uniforme y una filtración de partículas más fina.

## 9.- PRECAUCIONES Y RIESGOS EN LA UTILIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO

El carbón activo es un medio seguro y ampliamente utilizado en el tratamiento de agua, pero un uso o mantenimiento inadecuado puede generar algunos problemas. Uno de los principales riesgos es utilizar el carbón más allá de su capacidad útil. Cuando se alcanza el punto de ruptura (*breakthrough*), los contaminantes comienzan a aparecer progresivamente en el agua tratada, aunque aparentemente el filtro continúe funcionando con normalidad.

Otro aspecto importante es el crecimiento microbiológico. El carbón activo no genera microorganismos, pero puede crear condiciones favorables para su desarrollo. Los microorganismos presentes naturalmente en el agua pueden adherirse a su gran superficie porosa y, al mismo tiempo, el carbón elimina el cloro residual y retiene materia orgánica que puede servir

como nutriente. Si además existen temperaturas favorables o periodos prolongados de estancamiento, pueden multiplicarse y formar una capa denominada biofilm. Por tanto, una vez eliminado el cloro, el agua pierde parte de su protección frente al crecimiento microbiológico, aspecto especialmente importante cuando permanece almacenada o estancada después del filtro.

La acumulación de partículas y materia orgánica también puede provocar ensuciamiento, aumento de la pérdida de carga y reducción de la eficacia del carbón.

Finalmente, debe recordarse que el carbón activo no elimina todos los contaminantes. Utilizarlo sin conocer la calidad del agua o para contaminantes frente a los que no es eficaz puede generar una falsa sensación de seguridad. Por ello, deben respetarse los caudales de trabajo, condiciones de utilización y periodos de sustitución recomendados, evitando mantener un cartucho en servicio únicamente porque todavía conserva un caudal aparentemente normal.

## 10.- PERIODOS DE SUSTITUCIÓN DE LOS CARTUCHOS DE CARBÓN ACTIVO

El carbón activo no debe sustituirse únicamente en función del tiempo, ya que su duración depende de la cantidad de agua tratada, la concentración y tipo de contaminantes, el caudal, la cantidad y características del carbón y las condiciones de utilización.

Desde el punto de vista de la adsorción, el cartucho debería sustituirse antes de alcanzar el punto de ruptura (*breakthrough*), es decir, antes de que el contaminante comience a superar el nivel máximo establecido en el agua de salida. Sin embargo, la capacidad de adsorción no es el único criterio. En aplicaciones de agua potable también debe considerarse el posible crecimiento microbiológico, especialmente después de eliminar el cloro y cuando existen periodos de estancamiento. Por ello, un cartucho puede requerir sustitución, aunque todavía conserve parte de su capacidad adsorbente.

En la práctica, el periodo de sustitución debe establecerse considerando dos límites: la capacidad útil del carbón y el tiempo máximo de uso recomendado por el fabricante, aplicándose el que se alcance primero. Por tanto, que un cartucho siga dejando pasar agua o continúe eliminando olores y sabores no significa necesariamente que deba mantenerse en servicio.

Como referencia, en aplicaciones domésticas con agua potable de red puede establecerse un periodo orientativo de sustitución de aproximadamente 6 meses, siempre que no se alcance antes la capacidad máxima de tratamiento indicada por el fabricante. Este periodo puede reducirse en función de la calidad del agua, el consumo, las condiciones de funcionamiento y el riesgo de crecimiento microbiológico. Por tanto, el criterio de sustitución debería ser el primero que se alcance: tiempo máximo de uso o capacidad máxima de tratamiento.