

CAPACITACIÓN EN VIVO

CARBÓN ACTIVADO GRANULAR PARA CUMPLIR CABALMENTE CON LA **NOM-127-SSA1-2021**

- ✓ Capacidad del CAG.
- 💧 Contaminantes que afectan al CAG.
- ⚙️ Dimensionamiento y operación.



IMPARTIDO POR:
Ing. Germán Groso

CAG EN LA OBTENCIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO



CAPACITACIÓN EN VIVO

Carbotecnia

CARBÓN ACTIVADO GRANULAR PARA CUMPLIR CABALMENTE CON LA NOM-127-SSA1-2021

- Capacidad del CAG.
- Contaminantes que afectan al CAG.
- Dimensionamiento y operación.

IMPARTIDO POR:
Ing. Germán Groso

NOM-127-SSA1-1994

Establece los límites permisibles de **calidad** y los **tratamientos de potabilización** del agua para uso y consumo humano en México

Entra en vigor el **19 enero 1996**

CUMPLIMIENTO NORMATIVO



El 15 de agosto 1994 se publica en el DOF el proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Los interesados tuvimos 90 días naturales para presentar comentarios ante el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario.

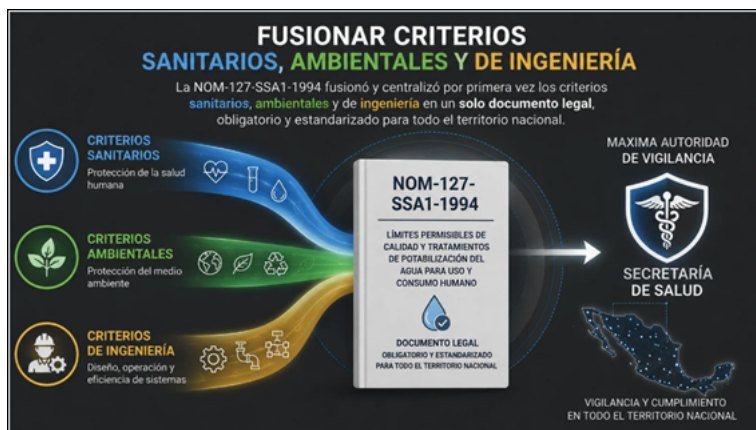


Enviamos comentarios a nombre de Nobrac Mexicana, empresa que fundamos en 1988. En ellos, actuamos como “abogados del diablo” respecto al carbón activado: expresamos que este medio no era eficaz para adsorber algunos de los contaminantes señalados.

El 3 de febrero de 1995 se publicaron en el DOF las respuestas a los comentarios. El comité los aceptó —lo que no es sencillo que ocurra, puesto que el comité está formado por técnicos con buenas bases y a quienes hay que convencer—.

El origen difícil de la empresa nos enseñó a ser exigentes con el carbón activado y a no ofrecer lo que este no puede realizar mejor que otras tecnologías.

El 18 de enero de 1996 se publicó la norma definitiva y el 19 de enero de 1996 entró en vigor.



La importancia histórica de la NOM-127-SSA1-1994 radicó principalmente en el hecho de que fusionó y centralizó por primera vez los criterios sanitarios, ambientales y de ingeniería que estaban dispersos, en un solo documento legal, obligatorio y estandarizado para todo el territorio nacional. Asimismo, otorgó la máxima autoridad de vigilancia a la Secretaría de Salud.

El sistema de las NOM nació formalmente con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización de 1992.



Los límites que estableció la NOM-127 cuando se publicó por primera vez en 1996 utilizaron como base técnica los parámetros del *Instructivo para la Vigilancia y Certificación de la Calidad Sanitaria del Agua para Consumo Humano* redactado por la Comisión Interna de Salud Ambiental y Ocupacional y publicado por la SSA (Secretaría de Salud) en 1987 [Ver Nota 1]. Estos, a su vez, fueron adoptados textualmente del pionero *Manual de Normas de Calidad para Agua Potable* editado por la SAHOP en 1982 [ver Nota 2].

[Nota 1: en 1985, bajo la presidencia de Miguel de la Madrid, se modernizó la anticuada *Secretaría de Salubridad y Asistencia* y se le cambió el nombre por *Secretaría de Salud*. Se decidió conservar el acrónimo SSA]

[Nota 2: SAHOP es el acrónimo de la *Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas*]

Aunque los dos documentos mencionados ya establecían límite a un número importante de parámetros, la NOM-127-SSA1-1994 marcó una evolución histórica al endurecer drásticamente el control de la toxicidad crónica y regular por primera vez contaminantes industriales y subproductos de desinfección como los trihalometanos [Ver Nota 3].

[Nota 3: SSA1 corresponde al Comité de Regulación y Fomento Sanitario (el que vigila el agua y los alimentos). SSA2 corresponde al Comité de Prevención y Control de Enfermedades. SSA3 corresponde al Comité de Innovación, Desarrollo y Calidad en Salud].

En la era previa a las NOM, el marco sanitario coexistía con los *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89*, publicados por la SEDUE en 1989 en su apartado de "Abastecimiento de agua de uso público urbano" Aunque estos documentos eran los pilares regulatorios de los años 80, presentaban discrepancias en algunos parámetros, una brecha técnica que la NOM-127 vino finalmente a unificar bajo una sola norma de observancia obligatoria.

Los límites que establecía el Instructivo de la SSA (1987) y el Manual de la SAHOP (1982) eran los que aparecen en las siguientes tablas, en la columna de la derecha, en color blanco y fondo negro. En aquellos renglones en los que no se incluyen palabras o números en fondo amarillo, es porque la primera versión de la NOM-127-SSA1-1994 incluyó el parámetro y no cambió el límite permisible. Y en aquellos renglones en los que aparecen expresiones en fondo amarillo es porque la NOM-127 incluyó el parámetro pero cambió el límite:

Características bacteriológicas	
Parámetro	Límite permisible antes de 1994
Bacterias coliformes	Ausencia (general) (NOM-127-1994: Separado en totales y fecales; ausencia en ambos)

Características organolépticas y fisicoquímicas

Parámetro	Límite permisible antes de 1994
pH	6.5 a 8.5
Color	20 Pt-Co
Turbiedad	5 UTN
Olor y sabor	No objetable (agradable)
Sólidos disueltos Totales	500 mg/L (NOM-127-1994: 1000 mg/L)
Dureza total (como CaCO ₃)	500 mg/L
Cloruros (como Cl ⁻)	250 mg/L
Sulfatos (como SO ₄ ²⁻)	400 mg/L
Nitratos (como N)	10 mg/L
Fluoruros (como F ⁻)	1.5 mg/L
Cloro residual libre	Mencionado solo como requisito operativo (NOM-127-1994: 0.2 a 1.5 mg/L)

Metales pesados y metaloides

Parámetro	Límite permisible antes de 1994
Arsénico (As)	0.05 mg/L
Plomo (Pb)	0.05 mg/L (NOM-127-1994: 0.01 mg/L)
Cadmio (Cd)	0.01 mg/L (NOM-127-1994: 0.005 mg/L)
Mercurio (Hg)	0.002 mg/L (NOM-127-1994: 0.001 mg/L)
Cromo Total (Cr)	0.05 mg/L
Bario (Ba)	1.0 mg/L (NOM-127-1994: 0.7 mg/L)
Plata (Ag)	0.05 mg/L
Cianuros (como CN ⁻)	0.05 mg/L (NOM-127-1994: 0.07 mg/L)
Hierro (Fe)	0.3 mg/L
Manganeso (Mn)	0.1 mg/L (NOM-127-1994: 0.15 mg/L)
Cobre (Cu)	1.0 mg/L (NOM-127-1994: 2.0 mg/L)
Zinc (Zn)	5.0 mg/L

Compuestos orgánicos y plaguicidas

Parámetro	Límite permisible antes de 1994
Sustancias activas al azul de metileno (detergentes)	0.5 mg/L
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001 mg/L
Aldrín y dieldrín (plaguicidas organoclorados)	0.01 mg/L (NOM-127-1994: 0.00003 mg/L)
Endrín	0.0002 mg/L
Lindano	0.004 mg/L (NOM-127-1994: 0.002 mg/L)
Metoxicloro	0.1 mg/L (NOM-127-1994: 0.02 mg/L)
2,4-D (organofosforado)	0.1 mg/L (NOM-127-1994: 0.03 mg/L)

Límites que se agregaron en la NOM-127-1994:

Parámetros fisicoquímicos e inorgánicos

Parámetro	Límite permisible que se agregó en la NOM-127-1994
Aluminio	0.2 mg/L
Sodio	200 mg/L
Nitritos	1.0 mg/L
Nitrógeno amoniacal	0.5 mg/L

Subproductos de la desinfección

Parámetro	Límite permisible que se agregó en la NOM-127-1994
Trihalometanos totales	0.20 mg/L

Hidrocarburos aromáticos

Parámetro	Límite permisible que se agregó en la NOM-127-1994
Benceno	0.01 mg/L
Tolueno	0.70 mg/L
Etilbenceno	0.30 mg/L
Xileno (tres isómeros)	0.5 mg/L

Límites que se agregaron en la NOM-127-1994:

Plaguicidas

Parámetro	Límite permisible que se agregó en la NOM-127-1994
DDT (total de isómeros)	0.001 mg/L
Clordano (total de isómeros)	0.0002 mg/L
Hexaclorobenceno	0.001 mg/L
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.00003 mg/L

Características radiactivas

Parámetro	Límite permisible que se agregó en la NOM-127-1994
Radiactividad Alfa Global	0.1 Bq/L
Radiactividad Beta Global	1.0 Bq/L

Se puede observar que el Manual de la SAHOP y el Instructivo de la SSA establecían límites a 31 parámetros. La NOM-127-SSA1-1994 agregó otros 15, para dar un total de 46 parámetros.

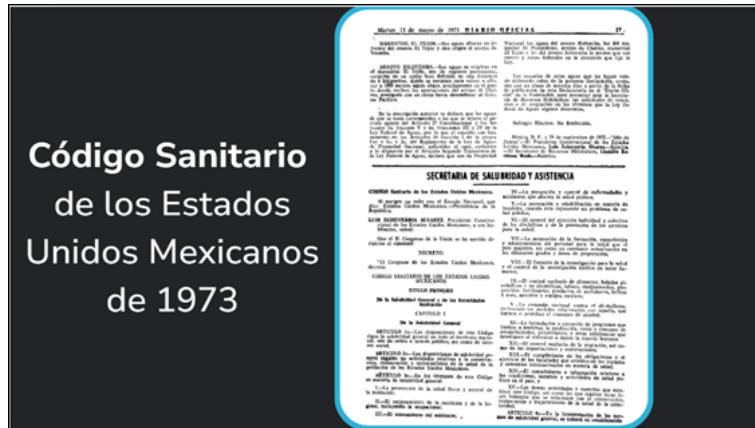
En otras palabras, el número de parámetros aumentó cerca de 50%.

Es interesante notar que la NOM-127 no parte de cero. Ya había límites establecidos para un buen número de parámetros.

PARÁMETROS CRÍTICOS CONSIDERADOS ANTES DE LA NOM-127-SSA1-1994

Turbiedad	< 5 UNT
Color	< 20 Pt-Co
Cloro residual	0.2 a 1.5 mg/L
Especificación sanitaria	Ausencia de coliformes
Metales pesados:	
Arsénico	< 0.05 mg/L
Plomo	< 0.05 mg/L
Cromo total	< 0.05 mg/L
Fluoruros	< 1.5 mg/L
Cianuros	< 0.05 mg/L

Aunque el Manual de la SAHOP de 1982 y el Instructivo de la SSA de 1987 ya incluían los parámetros mostrados en las tablas anteriores, antes de la entrada en vigor de la NOM-127-SSA1-1994 solamente se atendía a aquellos que se consideraban críticos y que se muestran en la imagen.



Antes del Manual de la SAHOP de 1982, a nivel de ley de salud, la obligatoriedad de vigilar el agua provenía del *Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos* de 1973, que era operado por la antigua Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA). Este código establecía las atribuciones legales para sancionar a los municipios si el agua distribuida causaba brotes epidemiológicos, pero no desglosaba tablas analíticas tan complejas como las de ahora.

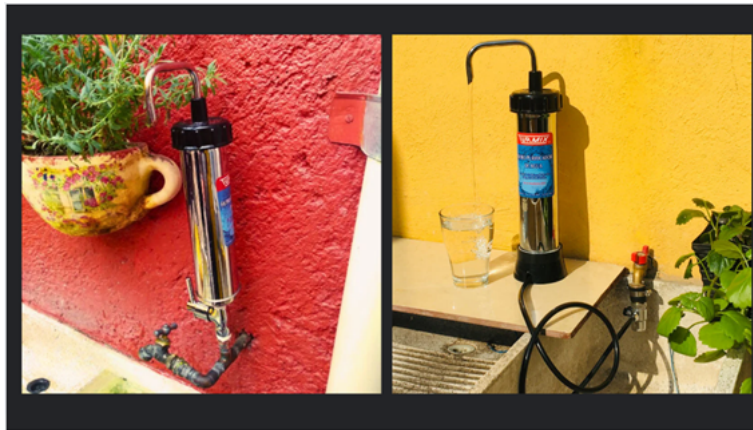
Es interesante subrayar que el Manual de la SAHOP es el primer documento que establece límites a parámetros específicos del agua destinada al consumo humano.



Los menos jóvenes recordaremos que hasta finales de los 80s o mediados de los 90s, gran parte de la población —y en particular los niños— bebíamos agua “directamente de la llave”.



Podemos recordar que algunos hervían el agua en la casa como medio de desinfección, para luego dejarla enfriar y poder beberla de manera más segura.



También recordamos que se instalaron una gran cantidad de filtros cerámicos que fueron verdaderamente icónicos en las casa de las familias mexicanas. La marca Turmix sigue en el mercado y ha seguido ofreciendo sus robustos equipos.

Si revisáramos los laboratorios de los años 70 o principios de los 80, la filosofía de medición de contaminantes se basaba en tres pilares radicalmente distintos a los actuales:

- La guerra absoluta contra las bacterias (enfoque agudo): el enemigo público número uno de la época eran las infecciones hídricas letales e inmediatas, como el cólera, la tifoidea y la disentería amebiana. Por lo tanto, el parámetro verdaderamente sagrado era que el agua tuviera una dosificación obligatoria de cloro residual libre (mínimo 0.2 mg/L) y ausencia de coliformes. Si el agua no causaba una infección estomacal a los tres días de beberla, pasaba la prueba de potabilidad.
- Adopción ciega de límites internacionales (OMS 1971 y US PHS 1962): en aquellos años, México no realizaba estudios epidemiológicos propios para determinar qué tan tolerante era la población local a los químicos. La SAHOP y la SSA copiaron textualmente los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en sus Normas Internacionales de 1971 y las del *Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos de 1962*.
- Cero control de subproductos orgánicos: En la década de los 70 y principios de los 80, conceptos como *Trihalometanos*, *Ácidos Haloacéticos* o compuestos halogenados no existían en las tablas regulatorias mexicanas. El descubrimiento científico de que el cloro reaccionaba con el COT del agua para generar compuestos cancerígenos era muy reciente a nivel mundial (mediados de los 70) y los laboratorios del país no contaban con la tecnología de cromatografía necesaria para medir trazas tan diminutas. Debido a esto, el cloro se inyectaba "a manos llenas" en los sistemas de Chapala o en los pozos sin que a nadie le preocuparan los efectos colaterales de la desinfección.

En conclusión: antes de 1987, el estándar de calidad era mucho más simple y "macroscópico". Si el agua salía con baja turbiedad (menos de 5 UTN), no tenía un color exagerado (menos de 20 unidades Pt-Co), registraba los niveles mínimos de cloro residual y cumplía con el análisis anual básico de los metales pesados tradicionales dictados por la SAHOP, el agua se declaraba formalmente apta para toda la población.



Para entender por qué la NOM-127 (cuya actualización más reciente y drástica es la NOM-127-SSA1-2021) se vuelve cada vez más estricta, debemos dividirlo en tres grandes fuerzas:

1. El factor principal: hoy sabemos el daño real de los contaminantes (Toxicología)

Este es el verdadero motor del cambio. En 1994, la ciencia médica consideraba que ciertos niveles de contaminantes eran "tolerables" a largo plazo. Hoy, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y los institutos de investigación tienen datos epidemiológicos de décadas que demuestran que exposiciones crónicas, incluso a dosis minúsculas, pueden tener efectos muy negativos en la vida del ser humano.

2. El factor habilitador: mejores métodos de medición y tratamiento (Tecnología)

Una norma no puede exigir un límite que no se pueda medir en un laboratorio o que no se pueda tratar en una planta; si lo hiciera, la norma sería inaplicable.

- En la metrología (Medición): En los años 80 y 90, medir partes por billón (ppb) de plomo o mercurio requería laboratorios de la NASA. Hoy en día, los equipos de espectrometría de masas (ICP-MS) están democratizados; cualquier laboratorio de referencia en México puede detectar trazas infinitesimales. La tecnología le da la certeza legal a la autoridad para exigir el límite.
- En el tratamiento: Hace 30 años, la ósmosis inversa, la ultrafiltración y la oxidación avanzada eran tecnologías espaciales y prohibitivamente caras para un municipio. Hoy, gracias a la producción en masa, los costos de las membranas y de sistemas como el dióxido de cloro han bajado drásticamente. Al volverse económicamente viables, el gobierno puede exigir su adopción sin "quebrar" financieramente a los organismos operadores.

3. El factor de presión: la realidad del agua en México y en el mundo: contaminación y sobreexplotación

La contaminación real de las fuentes de abastecimiento también obliga a endurecer la norma, pero no solo porque tiremos más desechos, sino por cómo extraemos el agua:

- Contaminación geogénica (por sobreexplotación): En gran parte del centro y norte de México, los acuíferos están sobreexplotados. Al agotarse el agua superficial, los municipios se ven obligados a perforar pozos cada vez más profundos (a 300, 500 o más metros). A esa profundidad, el agua ha estado en contacto con rocas térmicas durante miles de años, por lo que sale cargada de altas concentraciones naturales de arsénico y fluoruro. La norma se tuvo que volver estricta para forzar a los municipios a tratar esa agua subterránea profunda.
- Contaminación antropogénica (contaminantes emergentes): las descargas industriales y municipales han llevado a los ríos sustancias que antes no existían en el agua: ingredientes activos farmacéuticos (APIs), hormonas, plaguicidas modernos y detergentes complejos. Esto obliga a la norma a evolucionar para proteger a las poblaciones aguas abajo.

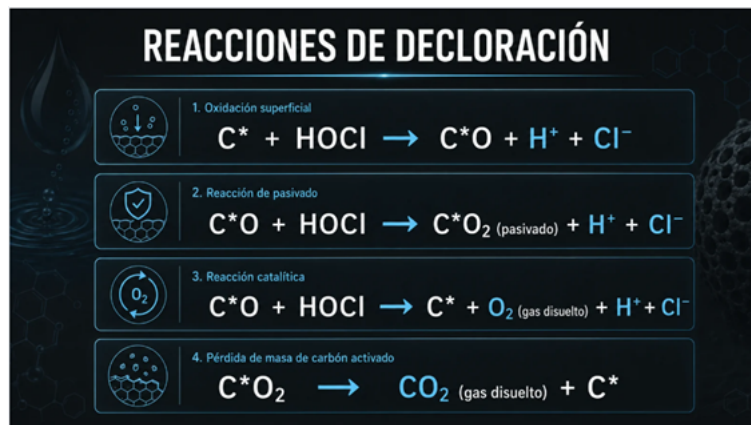
Resumen de la evolución:

La NOM-127 se vuelve más rigurosa porque:

1. La medicina descubre que lo que creíamos seguro en los 90, en realidad nos está enfermando (el *porqué*).
2. La ingeniería desarrolla métodos más baratos y precisos para medir y remover esos contaminantes (el *cómo*).
3. La crisis hídrica nos obliga a sacar agua de peor calidad de las entrañas de la tierra (la *urgencia*).



Cambiar la cultura no es sencillo. Como sociedad humana, sigue presente en muchos la idea de que potabilizar es clorar para inactivar microorganismos.



Después de que el cloro libre ha cumplido su función, hay que disminuir (por no decir, eliminar, que desde un punto de vista estricto, es algo severo) su presencia en el agua y esto se puede lograr de manera muy sencilla mediante carbón activado granular (CAG). La capacidad de decloración del CAG es muy alta.

Las reacciones por las que el CAG declora son diversas. En la imagen anterior mostramos cuatro de ellas. En todas, el átomo de carbono que forma parte de las placas que conforman el carbón activado se expresa como C*. Podemos observar que las reacciones de decloración llevan a la formación de CO₂ que se disuelve en el agua y que luego pasa a la atmósfera. La estequiometría de estas reacciones lleva a calcular que un kilogramo de carbón activado podría declorar poco menos de 12 millones de litros de agua con una concentración de cloro libre de 1 mg/L.



Ahora bien, el hecho de que parte de los óxidos superficiales que se forman en el CAG (C^*O y C^*O_2) permanecen, van "pasivando" (cubriendo) la superficie del carbón activado y en dicho área puede no ocurrir la deoloración. Por este motivo, típicamente, el CAG puede decolorar alrededor de 2 millones de litros de agua con una concentración inicial de cloro libre de 1 mg/L antes de que el efluente de la cama de CAG alcance el punto de ruptura y presente una concentración de cloro libre que iguale 0.1 mg/L.

Si se consideran los compuestos inorgánicos y orgánicos oxidables presentes en las aguas con menor contaminación (el agua de fuentes naturales siempre tiene compuestos disueltos), la capacidad de deoloración del CAG antes de alcanzar el punto de ruptura de 0.1 mg/L puede rondar los 400 m³ de agua por kg de CAG (cuando el agua presentaba una concentración original de cloro libre de 1 mg/L).

Sobra mencionar que la capacidad de deoloración de un CAG es sustancialmente mayor que su capacidad de adsorción.

Además, la velocidad con la que el CAG decolora es mucho mayor que aquella con la que desorbe. Para decolorar, es suficiente un tiempo de contacto en cama vacía (TCCV) de entre 20 s y 2.5 min.



De manera muy resumida, el carbón activado:

- Adsorbe moléculas no iónicas (y si la molécula es grande, la adsorbe por la parte no iónica).
- Prefiere las moléculas con menor polaridad.
- Adsorbe moléculas que caben en los poros del carbón, y de entre estas, prefiere a las de mayor masa y tamaño.
- Lo anterior, sin considerar la química superficial, que, aunque puede ser importante, lo es menos que lo anterior.

Las siguientes tablas muestran los compuestos orgánicos para los que la NOM-127-SSA1-2021 tiene establecidos límites máximos permitidos. Solamente no se incluye el formaldehído, ya que el carbón activado no lo retiene con eficiencia (por el hecho de que es una molécula pequeña, volátil y polar).

Para el resto de los compuestos mencionados, la norma señala al carbón activado como tecnología para retenerlos (excepto en el caso de uno o dos de ellos, que sí adsorbe el carbón activado. Quizás hubo un error en la elaboración de la norma y nadie del público externó su comentario al Comité encargado de la elaboración y publicación del proyecto de la misma en los 90 días que la ley otorga para ello).

Para cada compuesto que incluye la tabla, esta muestra la molécula esquelética (que da una idea de la polaridad), la masa molecular (que da una idea del tamaño), el diámetro cinético (que da una más clara idea del tamaño) y el logaritmo del coeficiente octanol/agua, $\log K_{OW}$, que da una idea de qué tan adsorbible es la molécula en carbón activado.

El diámetro cinético de una molécula es el que toma en cuenta su rotación en todos los sentidos del espacio. Ayuda a elegir el carbón activado más adecuado para adsorberla. Para que un carbón activado adsorba con eficiencia una molécula determinada, es necesario que esta quepa en la mayoría de los poros, pero que no sea demasiado pequeña. Si la molécula entra en el poro y es lo suficientemente grande, es atrapada por las fuerzas de London que ocurren simultáneamente entre la molécula y las dos paredes opuestas que forman el poro. Si la molécula es muy pequeña, solamente experimentará atracción con una de las paredes; en este caso, al ser adsorbida con menor fuerza, la molécula puede escapar por desorción. Las fuerzas de London tienen un alcance corto, de no más de tres capas moleculares. Por lo tanto, lo óptimo es que la molécula a adsorber quepa en la mayoría de los poros y que su diámetro cinético represente, al menos, un 17% del diámetro de los mismos.

El coeficiente octanol/agua se determina agregando el compuesto a volúmenes adecuados de octanol y agua para que, después de agitar con fuerza, el compuesto se disuelva en ambos líquidos de acuerdo con su tendencia a hacerlo en cada uno de ellos. El término

“adecuados” significa que el volumen de cada líquido debe ser suficiente para que la concentración del compuesto no se acerque a la saturación. Se usa este coeficiente ya que el comportamiento del octanol se asemeja al del carbón activado (que es un sólido covalentemente unido pero con cierta proporción de óxidos en los bordes de sus placas grafiticas). Es así que, mientras mayor es la proporción en la que el compuesto se disuelve en octanol, mayor es su adsorbabilidad en carbón activado. Si se reporta el logaritmo del mencionado coeficiente (log K_{OW}), valores menores a 1 corresponden a compuestos poco adsorbibles, valores entre 1 y 2 corresponden a una zona “gris” que hay que analizar, y valores mayores a 2 indican que el compuesto es muy adsorbible.

Parámetro (NOM-127-SSA1-2021)	Fórmula esquelética	Masa molecular (g/mol)	Diámetro cinético aprox. (Å)	log K_{OW} (octanol/agua)
Microcistina-LR		995.2	-19 - 25	-1 a 0
Bromodlorometano		163.8	6.0	-2.0
Bromoformo		252.7	6.6	-2.4
Cloroformo		119.4	5.5	-1.9
Dibromodlorometano		208.3	6.4	-2.2
Ácido cloroacético		94.5	4.5	-0.7
Ácido dicloroacético		128.9	5.0	-0.3
Ácido tricloroacético		163.4	5.6	-0.7
Benceno		78.1	5.9	-2.1
Estireno		104.1	7.4	-2.9
Etilbenceno		106.2	6.7	-3.2
Tolueno		92.1	6.7	-2.7
Xilenos (isómeros o-, m- y p-)		106.2	6.8 - 7.4	-3.0 - 3.2

Nota: 1 Å = 0.1 nm. Los diámetros cinéticos son valores aproximados reportados en la literatura y pueden variar según el método y condiciones. log K_{OW} a 25 °C.

Parámetro (NOM-127-SSA1-2021)	Fórmula esquelética	Masa molecular (g/mol)	Diámetro cinético aprox. (Å)	log K_{OW} (octanol/agua)
Microcistina-LR		995.2	-19 - 25	-1 a 0
Bromodlorometano		163.8	6.0	-2.0
Bromoformo		252.7	6.6	-2.4
Cloroformo		119.4	5.5	-1.9
Dibromodlorometano		208.3	6.4	-2.2
Ácido cloroacético		94.5	4.5	-0.7
Ácido dicloroacético		128.9	5.0	-0.3
Ácido tricloroacético		163.4	5.6	-0.7
Benceno		78.1	5.9	-2.1
Estireno		104.1	7.4	-2.9
Etilbenceno		106.2	6.7	-3.2
Tolueno		92.1	6.7	-2.7
Xilenos (isómeros o-, m- y p-)		106.2	6.8 - 7.4	-3.0 - 3.2

Nota: 1 Å = 0.1 nm. Los diámetros cinéticos son valores aproximados reportados en la literatura y pueden variar según el método y condiciones. log K_{OW} a 25 °C.

Tabla A.1 Límites permisibles de compuestos orgánicos halogenados adsorbibles fijos

Parámetro (NOM-127-SSA1-2021)	Fórmula esquelética	Masa molecular (g/mol)	Diámetro cinético aprox. (Å)	log K_{OW} (octanol/agua)
Hexaclorobutadieno		260.8	6.6	-3.4
Pentaclorofenol		266.3	5.6	-4.7
2, 4, 6 Triclorofenol		197.5	5.3	-3.1
Epiclorhidrina		92.5	4.5	-1.5
Alacloro		269.8	6.6	-2.6
Combinación Aldrin + Dieldrin		364.9	7.0	-6.5
Atrazina		215.7	6.2	-2.7
Clordano (total de isómeros)		409.7	6.9	-5.3
Cianazina		241.7	6.6	-2.5
DDT y metabolitos		354.5	7.2	-6.2
Endrin		380.9	6.8	-5.1
Lindano		290.8	6.1	-3.6
Metolacloro		283.8	6.6	-2.4
Metolcicloro		345.6	7.0	-5.1
Pendimetalina		281.3	7.0	-5.0
Terbufosfatina		229.7	6.2	-2.8
Trifluralina		335.3	7.1	-4.2
2,4-D		221.0	5.4	-2.6
2,4,5-T		255.5	5.5	-2.8
2,4,5-TP		271.5	5.7	-2.9
2,4-DB		257.1	5.6	-2.6
Dicloroprop		233.1	5.4	-2.5
Mecoprop		199.6	5.2	-1.9
Clorotolueno		212.7	6.1	-2.7

Nota: 1 Å = 0.1 nm. Los diámetros cinéticos son valores aproximados reportados en la literatura y pueden variar según el método y condiciones. log K_{OW} a 25 °C.

Tabla A.2 Límites permisibles de compuestos orgánicos no halogenados

Parámetro (NOM-127-SSA1-2021)	Fórmula esquelética	Masa molecular (g/mol)	Diámetro cinético aprox. (Å)	log K_{ow} (octanol/agua)
Aldicarb		191.3	-5.5	-0.8
Carbofurán		221.3	-5.6	-1.6
Ácido edético		292.2	-7.0	-3.0
Ácido nitrilotriacético		191.1	-6.0	-2.4
Acrilamida		71.1	-3.8	-0.7
Benzo(a)pireno		252.3	-7.0	-6.0
Chlorpirifos		350.6	-7.2	-4.7
Dimetoato		229.3	-5.8	-0.8
Moltrato		187.3	-5.3	-1.5
Simaxina		201.7	-6.0	-2.1
Di-(2-Ethexil) ftalato		390.6	-8.6	-7.6
Isoproturon		206.3	-6.0	-2.5

Nota: 1 Å = 0.1 nm. Los diámetros cinéticos son valores aproximados reportados en la literatura y pueden variar según el método y condiciones. log K_{ow} a 25 °C.

Tabla A.3 Límites permisibles de compuestos orgánicos halogenados adsorbibles purgables

Parámetro (NOM-127-SSA1-2021)	Fórmula esquelética	Masa molecular (g/mol)	Diámetro cinético aprox. (Å)	log K_{ow} (octanol/agua)
1,2-Diclorobenceno		147.0	6.8 - 7.2	-3.4
1,2-Dicloroeteno (cis + trans)		96.9	6.0 - 6.3	-2.0
1,2-Dicloropropano		112.9	6.4 - 6.8	-2.1
1,2-Dicloroetano		98.9	6.0 - 6.3	-1.5
1,3-Dicloropropeno (cis + trans)		110.9	6.3 - 6.7	-2.3
1,4-Diclorobenceno		147.0	6.8 - 7.2	-3.4
Cloruro de vinilo		62.5	5.2 - 5.5	-1.1
Diclorometano		84.9	5.0 - 5.3	-1.3
Tetracloroetano		165.8	6.6 - 7.0	-3.0
Tetracloruro de carbono		153.8	6.2 - 6.6	-2.8
Tricloroetano		133.4	6.3 - 6.7	-2.4
1,2-Dibrometano		187.9	6.2 - 6.6	-1.6
1,2-Dibromo-3-cloropropano		200.3	6.5 - 6.9	-2.5

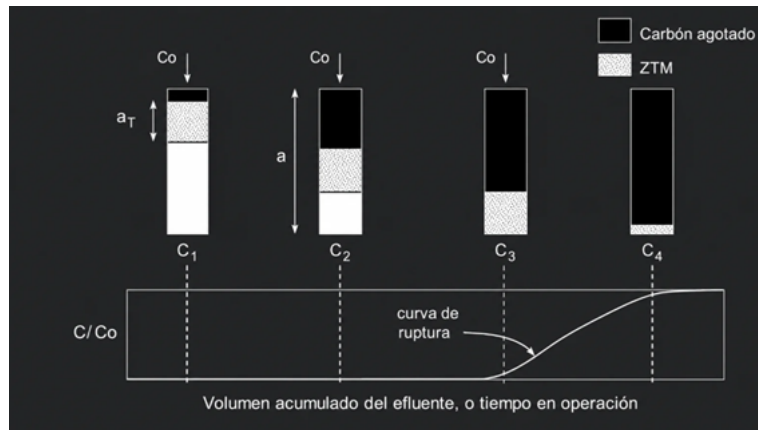
Nota: 1 Å = 0.1 nm. Los diámetros cinéticos son valores aproximados reportados en la literatura y pueden variar según el método y condiciones. log K_{ow} a 25 °C.

En Carbotecnia podemos analizar el caso de aquellas personas o empresas que requieren los carbones activados que ofrecemos.

**La capacidad de adsorción de un
carbón activado en el equilibrio
suele ser de entre**

**20 y 80 g de adsorbatos retenidos
por 100 g de carbón activado**

Cuando el diámetro predominante de un carbón activado es el adecuado para adsorber un compuesto específico, la capacidad del carbón suele ser de entre 20 y 80 g del compuesto por 100 g de carbón activado.



Ya que el CAG se cambia, no cuando se ha saturado, sino cuando se alcanza el punto de ruptura —en el que la concentración del contaminante supera una concentración máxima permisible—, su capacidad operativa real es menor: en muchos casos es de alrededor del 30% de la capacidad en el equilibrio.

TIEMPO DE CONTACTO EN CAMA VACÍA

TCCV (min)

$$TCCV = \frac{Vc}{F}$$

Vc = volumen de la cama de CAG
F = flujo instantáneo de servicio

El parámetro de diseño más importante para dimensionar una cama de CAG es el tiempo de contacto en cama vacía (TCCV).

CARGA HIDRÁULICA O VELOCIDAD DE FLUJO

C_H (gpm/ft²)

$$C_H = \frac{F}{A}$$

F = flujo instantáneo de servicio
A = área de sección de la cama de CAG

El segundo parámetro en importancia es la carga hidráulica o velocidad del flujo. Realmente debería llamarse “velocidad de flujo en cama vacía”.

VALORES DE TCCV PARA EL TRATAMIENTO DE LÍQUIDOS

**Típicamente
entre 20 s y 30 min**

Para decolorar, basta un TCCV que va entre 20 segundos y 2.5 minutos (según el caso). Para adsorber compuestos orgánicos se requiere un TCCV mayor. El análisis del agua que desea tratarse y la heurística (la experiencia) permiten proponer un TCCV que sea razonable para obtener un agua segura y para prever que el tiempo de vida útil de la cama de CAG suficiente —cambiar una cama de CAG, además de provocar paros operativos, requiere tiempo y esfuerzo que implican un costo—.

VALORES DE C_H PARA EL TRATAMIENTO DE LÍQUIDOS

- **No menos de 1 gpm/ft² (para evitar flujo laminar).**
- **No más de 7 gpm/ft² en carbones bituminosos (para evitar demasiada erosión en el CAG).**
- **El ingeniero de proceso elige la C_H que no genere una caída de presión excesiva.**

Si la carga hidráulica o velocidad de flujo en una cama de CAG es menor a 1 (o 2) gpm/ft², ocurren dos fenómenos indeseables:

- Engrosamiento de la capa límite: alrededor de cada gránulo de carbón hay una micro-capa de agua completamente estancada. Mientras más disminuye la velocidad de flujo, esa capa estancada se vuelve más gruesa y actúa como barrera que frena el paso de las moléculas orgánicas hacia el carbón por resistencia a la difusión.
- Caminos preferenciales (*channeling*): al disminuir aún más la velocidad, el agua busca el camino de menor resistencia y toma algunas venas o canales a través de la cama de CAG. El resto de la cama se convierte en "zonas muertas" por donde el agua casi no pasa. De esta manera, se reduce el tiempo de contacto, mientras que se desperdicia parte del carbón activado instalado.

Por otro lado, cuando la carga hidráulica supera los 6 o 7 gpm/ft², los gránulos de CAG empiezan a sufrir una erosión más severa —sobre todo aquellos carbones con menor resistencia mecánica—, además de que el sistema experimenta una mayor caída de presión que eleva el costo de bombeo.

PARAMÉTRO	Límite NOM-127-SSA1-2021 (mg/L)
Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles fijos	0.01
Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles purgables	0.005

Los parámetros de “Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles fijos” y “Compuestos orgánicos halogenados purgables” se incorporaron en la NOM-127-SSA1-2021 que entró en vigor en 2023.

Ya estaban contemplados en la NOM-201-SSA1-2015 que aplica al agua y al hielo destinados al consumo humano que se comercializan o distribuyen ENVASADOS o A GRANEL.

La estandarización del ensayo para analizarlos no fue sencilla.



Llegamos a ver un caso como el de la imagen, de un agua de pozo profundo, con una química nada complicada, un contenido muy bajo de contaminantes orgánicos y para la que el tren de tratamiento que se muestra (con excelente dimensionamiento y operación) no parecía disminuir la concentración de los parámetros que mencionamos.

Se observa que el tren de tratamiento contaba con un primer paso de decoloración y adsorción en cama de CAG, justo después del lecho profundo. Luego tenía un segundo paso de adsorción después del suavizador. Finalmente, había dos pasos más de adsorción conectados en serie para tratar el permeado de la ósmosis inversa. El carbón activado de los dos primeros adsorbedores era de origen mineral bituminoso y el de los dos últimos, de concha de coco. Todo el carbón activado era de calidad probada. El mineral bituminoso tenía un área superficial de 900 m²/g y el de concha de coco, de 1000 m²/g. Los cuatro adsorbedores de CAG operaban, cada uno de ellos, con un TCCV de 4.25 min y con una CH de 4.8 gpm/ft². El TCCV total, que es la suma del TCCV de los cuatro adsorbedores, es de 17 min. Es un tiempo más que suficiente. La carga hidráulica, que es la misma en los cuatro adsorbedores, es adecuada.

No era razonable que el carbón activado no los adsorbiera, cuando el término “adsorbibles” que forma parte de su nombre, se refiere a “adsorbibles en carbón activado”.

Tampoco parecía razonable que estos compuestos traspasaran la membrana de ósmosis inversa.

En ese momento, los laboratorios que analizan estos parámetros, aún no tenían acreditados los ensayos correspondientes. Concluimos, entonces, que el resultado de las pruebas no era correcto.

Actualmente, hasta donde sabemos, ya se logró la estandarización y la acreditación. Parece que los resultados del ensayo son razonables, y que cuando están presentes, su presencia puede disminuirse mediante CAG instalado en camas bien dimensionadas y operadas.

PARAMÉTRO	Límite NOM-127-SSA1-2021 (mg/L)	Límite de detección del método (mg/L)	Límite práctico de cuantificación (mg/L)
Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles fijos	0.01	0.0003	0.005
Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles purgables	0.005	0.0008	0.005

Para los compuestos orgánicos halogenados adsorbibles fijos, el límite de detección del método es 0.0003 mg/L y el límite práctico de cuantificación es 0.005 mg/L. Resultados entre estos dos valores deben considerarse como “estimados”. El límite práctico de cuantificación es el mismo que el límite que permite la NOM-127.



El que un ensayo esté certificado es importante porque el método, el instrumental, el laboratorio y el laboratorista que lo realiza han pasado por todo el proceso correspondiente, que considera cada variable relacionada con la precisión y el sesgo.



Un escenario común que podemos encontrar es el de agua que llega al carbón activado con una carga excesiva de compuestos orgánicos. En ocasiones, son compuestos difíciles de adsorber, como ocurre con los ácidos húmicos, los ácidos fúlvicos y los polifenoles. Los ácidos húmicos tienen masas moleculares de entre 10,000\$ y 100,000 Da, mientras que los ácidos fúlvicos las tienen de entre 500\$ y 2,000 Da. Por su parte, los polifenoles presentan un espectro muy amplio que va desde los 150 Da en monómeros simples, hasta más de 30,000 Da

en estructuras poliméricas complejas como los taninos.

Algunos están presentes porque no son biodegradables y el tratamiento biológico no fue capaz de descomponerlos. También puede haber ocurrido que no se retuvieron en un proceso previo de coagulación-floculación-clarificación.

Independientemente de la razón por la que no se hayan separado del agua antes de que esta llegue al lecho de CAG, es obligatorio hacerlo. De lo contrario, saturarán prematuramente al carbón.

Tratamiento	DBO inicial (mg/L)	DBO final (mg/L)
Digestión anaerobia	> 1,000 - 5,000	400 - 2,000
Digestión aerobia	400 - 2,000	30 - 150
Oxidación química	100 - 400	30 - 70
Adsorción en carbón activado	40 a 100	No detectable
Ósmosis inversa	< 10	No detectable

Cabe recordar que el carbón activado es competitivo frente a otras tecnologías para atrapar compuestos orgánicos, cuando las concentraciones de estos son bajas y se requieren llevar a niveles mínimos, incluso indetectables.



Cuando el agua que llega al adsorbedor tiene una alta carga orgánica y proviene de un tratamiento biológico o de coagulación-floculación-clarificación, dos de los métodos más usados para tratarla antes de que llegue a la cama de CAG es la oxidación o la oxidación avanzada. En Carbotecnia ofrecemos el servicio de estudiar la viabilidad de estos dos tratamientos.

