

# L'impacte ambiental ocult del quiròfan: una anàlisi de la contaminació per gasos anestèsics i el rol de la farmàcia hospitalària

## INTRODUCCIÓ: EL DILEMA DE L'ANESTÈSIA SOSTENIBLE

El sector sanitari, en la seva missió de guarir, s'enfronta a la paradoxa de ser, alhora, un contribuent significatiu en la degradació ambiental. S'estima que si el sector sanitari mundial fos un país, seria el cinquè emissor de gasos d'efecte hivernacle (GEH) més gran del món<sup>1</sup>. Dins dels hospitals, l'àrea quirúrgica és un dels departaments amb major consum de recursos i generació de residus. En aquest entorn, els gasos anestèsics inhalatoris representen una font d'emissió directa i altament potent. Aquests compostos, dissenyats per a ser químicament estables i poc metabolitzats per garantir la seguretat del pacient, són exhalats i alliberats gairebé íntegrament a l'atmosfera a través dels sistemes d'evacuació de gasos<sup>2</sup>.

Aquesta realitat presenta un desafiament ètic i professional. És possible alinear l'excel·lència clínica amb la responsabilitat ambiental? La resposta és afirmativa, però requereix un canvi de paradigma i un compromís col·lectiu per part de tots els actors sanitaris.

Aquest article té com a objectius: proporcionar una revisió de l'evidència científica sobre l'impacte ambiental dels gasos anestèsics; comparar les alternatives farmacològiques i tecnològiques des d'una perspectiva de sostenibilitat; definir el rol del farmacèutic hospitalari com a agent de canvi en la implementa-

ció de pràctiques anestèsiques sostenibles; i contextualitzar aquestes accions dins del nou marc regulador europeu, que fa d'aquesta transició una necessitat ineludible.

## FISICOQUÍMICA DE LA CONTAMINACIÓ ATMOSFÈRICA ANESTÈSICA

La capacitat d'un gas anestèsic per a contribuir a l'escalfament global depèn de la seva estructura molecular, la qual determina la seva eficiència per absorbir radiació infraroja i el seu temps de permanència a l'atmosfera.

- **Estructura molecular i absorció de radiació:** Els gasos halogenats (desflurà, sevoflurà, isoflurà) contenen enllaços carboni-fluor (C-F). Aquests enllaços vibren a freqüències que coincideixen amb la "finestra atmosfèrica", una regió de l'espectre infraroig on el vapor d'aigua i el CO<sub>2</sub> no absorbeixen la radiació. Això els converteix en "súpergasos" d'efecte hivernacle, atrapant calor que altrament s'escaparia a l'espai. El desflurà (CF<sub>3</sub>-CHFO-CF<sub>3</sub>) és particularment potent per la seva alta simetria i la gran quantitat d'àtoms de fluor.
- **Vida atmosfèrica:** La persistència d'un gas a l'atmosfera depèn de la seva reactivitat. Els radicals hidroxils (OH·) són el principal "agent de neteja" de la troposfera. El sevoflurà, amb un enllaç C-H més susceptible a l'oxidació per part dels radicals OH·,

**Cristian Chaguaceda Galisteo**  
Farmacèutic Especialista  
Hospital Germans Trias i Pujol.

**Verónica Aguilera Jiménez**  
Farmacèutica Especialista  
Hospital de Mataró.

*Paraules clau:*  
Gasos anestèsics  
Contaminació ambiental  
Anestèsia verda

té una vida atmosfèrica relativament curta (1,1 anys). En canvi, el desflurà és molt més resistent, atorgant-li una vida de 14 anys. L'òxid nítrós (N<sub>2</sub>O) és extremadament estable, amb una vida atmosfèrica de 114 anys, la qual cosa li permet acumular-se i causar danys a llarg termini, inclosa la destrucció de l'ozó estratosfèric<sup>3</sup>.

La taula 1 resumeix aquestes propietats i les tradueix en un impacte tangible per a facilitar la seva comprensió.

## ANÀLISI DE CICLE DE VIDA (ACV): LA METODOLOGIA PER A QUANTIFICAR L'IMPACTE

Per prendre decisions basades en l'evidència, és crucial quantificar i comparar l'impacte ambiental total de les diferents opcions anestèsiques. L'anàlisi de cicle de vida és l'estàndard d'or per a aquesta tasca. Aquesta metodologia avalua tots els impactes ambientals associats a un producte o servei, des de l'extracció de matèries primeres fins a la seva eliminació final ("del bressol a la tomba").

En el context de l'anestèsia, un ACV complet inclou:

- **Fase de producció:** Síntesi química dels fàrmacs, purificació, producció d'envasos (ampolles de vidre, vials, xeringues de plàstic).
- **Fase de transport:** Distribució des del fabricant fins a l'hospital.
- **Fase d'ús clínic:** L'impacte més significatiu per als gasos inhalatoris, corresponent a les emissions directes a l'atmosfera. Per a l'anestèsia total in-

travenosa (TIVA), s'inclou el consum elèctric de les bombes d'infusió.

- **Fase de final de vida:** Gestió dels residus plàstics, vidre i fàrmacs no utilitzats.

Diversos estudis d'ACV han demostrat de manera consistent la superioritat ambiental de l'anestèsia total intravenosa (TIVA) i de l'anestèsia locoregional. Un estudi<sup>6</sup> va concloure que l'anestèsia locoregional tenia la petjada de carboni més baixa, seguida de prop per la TIVA. Les tècniques inhalatòries, especialment les que fan servir desflurà o òxid nítrós, presentaven un impacte d'ordre de magnitud superior. Les dades són contundents. Un estudi centrat en cirurgia pediàtrica va calcular que una anestèsia d'una hora amb TIVA generava 1,26 kg CO<sub>2</sub>e, enfront dels 2,98 kg CO<sub>2</sub>e d'una tècnica inhalatòria estàndard, una reducció del 58%<sup>7</sup>. Tot i que la fabricació del propofol i els residus plàstics de la TIVA tenen un impacte, aquest és marginal en comparació amb l'emissió directa dels gasos halogenats.

## ESTRATÈGIES DE MITIGACIÓ: UN ENFOCAMENT MULTIFACTORIAL

La transició cap a una "anestèsia verda" es basa en una jerarquia d'intervencions, coneguda com les "4R de l'Anestèsia Sostenible": Reduir, Reemplaçar, Reciclar i Regular. El servei de farmàcia és un actor clau en totes elles.

És important disposar de sistemes de control de consum dels diferents gasos anestèsics per a poder fer una valoració inicial de la situació i analitzar

l'evolució de les accions que es vagin implementant. Paral·lelament, és fonamental la conscienciació i formació del personal implicat.

## REEMPLAÇAR: PRIORITZACIÓ D'ALTERNATIVES DE BAIX IMPACTE

Aquesta és l'estratègia més efectiva i ha de ser la pedra angular de qualsevol política de sostenibilitat en anestèsia.

- **Anestèsia total intravenosa:** S'hauria de considerar la tècnica d'elecció sempre que sigui clínicament apropiada. La decisió depèn del tipus de cirurgia, les característiques del pacient i les seves comorbiditats. La TIVA no només redueix les emissions de GEH, si no que també s'ha associat amb una menor incidència de nàusees i vòmits postoperatoris i amb una recuperació més ràpida en certs contextos.
- **Anestèsia locoregional:** Els bloquejos nerviosos ecoguiats, l'anestèsia espinal o epidural ofereixen una excel·lent analgèsia amb una petjada de carboni gairebé nul·la. A més del benefici ambiental, aquestes tècniques sovint minimitzen els efectes secundaris sistèmics i milloren la recuperació postoperatoria del pacient.
- **Jerarquia d'agents inhalatoris:** Quan la via inhalatòria és necessària, la selecció del fàrmac és crucial. S'ha d'establir una política hospitalària que afavoreixi l'ús de sevoflurà per sobre de l'isoflurà i el desflurà. La presència de desflurà en la guia farmacoterapèutica hauria de ser reavaluada i

Taula 1. Propietats ambientals i impacte comparatiu dels principals gasos anestèsics.

Gas Anestèsic	Global Warming Potential (GWP) a 100 anys (CO <sub>2</sub> =1)	Vida Atmosfèrica (anys)	kg CO <sub>2</sub> e per Concentració alveolar mínima (MAC)-hora*	Equivalència en km (cotxe benzina)**
Desflurà	2.540	14	~20 kg	~182 km
Isoflurà	510	3,2	~4 kg	~36 km
Sevoflurà	130	1,1	~1.5 kg	~13 km
Òxid Nítrós (N <sub>2</sub> O)	298	114	~45 kg	~409 km

\*Estimació per a un manteniment anestèsic a 1 MAC amb un flux de gas fresc de 2 L/min.

\*\*Basat en una emissió mitjana de 110 g CO<sub>2</sub>/km. Font: Dades adaptades de l'IPCC AR5 (2014) i Sherman et al. (2012)<sup>4-5</sup>.

reposicionada, donat el seu alt potencial d'escalfament global i les alternatives disponibles.

## REDUIR: OPTIMITZACIÓ DE L'ÚS CLÍNIC I TÈCNIC

- **Anestèsia de baix flux:** El principal malbaratament de gas anestèsic no és el que el pacient absorbeix, sinó el que flueix pel circuit i s'evacua directament. La formació d'anestèsisòlegs en tècniques de baix flux (1 L/min) o flux mínim (0.5 L/min) redueix dràsticament el consum i les emissions (fins a un 50-75%) sense comprometre la seguretat. La implementació de monitors de concentració de gasos anestèsics en l'expiració pot facilitar la pràctica d'aquestes tècniques.
- **Evitar l'òxid nítrós:** Donat el seu perfil ambiental extremadament negatiu i l'existència d'alternatives, molts cen-

tres han desmantellat les seves instal·lacions centralitzades de  $N_2O$ , una mesura que genera un gran impacte positiu. L'eliminació progressiva o total de l'òxid nítrós ha de ser una prioritat en les polítiques hospitalàries de sostenibilitat.

- **Manteniment dels equips.** És imprescindible assegurar un manteniment adequat dels equips per a que aquests funcionin en òptimes condicions i assegurin un funcionament eficient sense cap risc de fuga.

## RECICLAR: TECNOLOGIA DE CAPTURA

Per a les emissions inevitables de gasos halogenats, han sorgit sistemes de captura de gasos anestèsics.

- **Funcionament:** Són dispositius amb filtres de materials adsorbents (zeolites, carbó actiu) que s'instal·len a la sortida dels sistemes d'evacuació de gasos de les màquines d'anestèsia. Aquests filtres capturen físicament les molècules d'anestèsic abans que arribin a l'atmosfera.

- **Economia circular:** Empreses com ZeoSys o programes de devolució com el de Baxter han creat un model d'economia circular. Els filtres saturats són recollits, i l'agent anestèsic capturat s'extreu, es purifica i es reintrodueix al mercat com a fàrmac genèric. El material absorbent també és reutilitzat per fabricar nous filtres. Aquesta gestió del residu no només evita la contaminació, sinó que redueix la necessitat de fabricar nou agent. Actualment, només hi ha plantes de reciclatge a Àustria i Alemanya, per la qual cosa també s'ha de tenir en compte la petjada de carboni que pot suposar el transport d'aquests cartutxos.

- **Implementació local:** Diversos hospitals a Espanya, com l'Hospital Universitari de Cruces a Bilbao, ja han implementat aquesta tecnologia de captura, reduint les emissions de gasos anestèsics d'un

36% en 2020 a un 5,5% al 2023<sup>8</sup>. A Catalunya Hospitals com l'Hospital Universitari Mollet, ja han implementat aquestes tecnologies amb èxit.

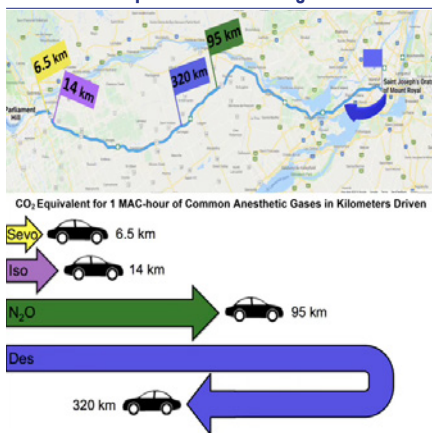
## MARC REGULADOR: EL NOU REGLAMENT (UE) 2024/573

El canvi ja no és voluntari, sinó una obligació legal. El nou **Reglament (UE) 2024/573 del Parlament Europeu** sobre gasos fluorats d'efecte hivernacle representa un abans i un després. La seva mesura més impactant per a la pràctica clínica és la **restricció sobre l'ús del desflurà a partir de l'1 de gener de 2026**, excepte en casos excepcionals on es consideri estrictament necessari per raons mèdiques<sup>9</sup>. Aquesta restricció obliga a tots els hospitals a actuar de manera imminent.

El servei de farmàcia ha de liderar aquest procés de transició forçada, que inclou:

- **Planificació de la desinversió:** Dissenyar un calendari per a la reducció d'estocs i la retirada definitiva del desflurà de la guia farmacoterapèutica. Això implica una gestió acurada dels inventaris i la coordinació amb el personal d'anestesiologia.
- **Anàlisi d'impacte pressupostari i clínic:** Modelitzar els costos de la seva substitució per sevoflurà o per un increment en l'ús de TIVA. Aquesta anàlisi ha de considerar no només el preu dels fàrmacs, sinó també els possibles estalvis associats a la reducció de les emissions.
- **Vigilància reguladora:** Mantenir-se informat sobre futures regulacions que, a llarg termini, podrien afectar altres gasos fluorats. La normativa europea és dinàmica i el farmacèutic ha d'anticipar-se a possibles canvis per assegurar la contínua conformitat de l'hospital.

**Figura 1: Mapa visual de l'equivalent de CO<sub>2</sub> per a 1 MAC-hora de gasos anestèsics en quilòmetres recorreguts.**



Es va representar una ruta des de Parliament Hill (111 Wellington St, Ottawa, ON, Canadà) fins a Saint Joseph's Oratory of Mount Royal (3800 Queen Mary Road, Montreal, QC, Canadà) mitjançant Google Maps. La distància total és de 192 km. L'equivalent de CO<sub>2</sub> de recórrer una distància (en quilòmetres) es calcula assumint que un cotxe emet 200 g de CO<sub>2</sub> per quilòmetre. L'emissió de desflurà és equivalent a la distància recorreguda fins a Montreal (bandera blava petita) i a mig camí de tornada a Ottawa (bandera blava gran). Desflurà (Des) = blau; isoflurà (Iso) = porpra; òxid nítrós (N<sub>2</sub>O) = verd; sevoflurà (Sevo) = groc; MAC-hora = 1 concentració alveolar mínima-hora. Font: Hanna M, Bryson GL. A long way to go: minimizing the carbon footprint from anesthetic gases. *Can J Anaesth.* 2019 Jul; 66 (7):838-839. doi: 10.1007/s12630-019-01348-1. Epub 2019 Mar 15. PMID: 30877589.

## EL ROL DEL FARMACÈUTIC HOSPITALARI: MÉS ENLLÀ DE LA DISPENSACIÓ

El farmacèutic hospitalari està en una posició única per orquestrar la transició cap a l'anestèsia sostenible. El seu rol ha d'evolucionar des d'un gestor logístic a un paper estratègic, capaç de fusionar coneixements farmacològics, econòmics i ambientals.

### GESTOR DE LA TRANSICIÓ FARMACOTERAPÈUTICA

És el responsable de redissenyar la guia farmacoterapèutica de l'anestèsia, basant-se en l'evidència clínica, l'impacte ambiental i el nou marc regulador. Ha de participar en el comitè de farmàcia per limitar l'ús del desflurà i establir criteris d'ús per a la resta d'agents, promovent opcions més sostenibles sense comprometre la seguretat del pacient.

### ANALISTA DE DADES I OPTIMITZADOR DE RECURSOS

El farmacèutic ha d'implementar sistemes de monitoratge del consum de gasos anestèsics. Utilitzant les dades de dispensació i els sistemes d'informació de l'hospital, pot crear quadres de comandament que mostrin el consum per quiròfan, per servei o fins i tot per procediment, i la seva transformació en

petjada de carboni (Kg CO<sub>2</sub>). Aquesta informació permet:

- Identificar *outliers* i àrees de millora.
- Quantificar l'estalvi econòmic i ambiental derivat de les intervencions (p. ex., formació en baix flux).
- Proporcionar informes objectius a la direcció i als caps de servei per a justificar inversions en tecnologia verda.

### EDUCADOR I COMUNICADOR INTERDISCIPLINARI

El canvi requereix conscienciació. Amb la participació del servei d'anestèsia s'han d'organitzar sessions, dirigides a anestesiològics, personal d'infermeria i gestors. Aquestes sessions han de traduir les dades complexes de GWP i ACV en missatges clars i accionables, posant èmfasi en els beneficis compartits (seguretat del pacient, estalvi econòmic i responsabilitat ambiental). La col·laboració interdisciplinària és fonamental per assegurar l'èxit de les iniciatives de sostenibilitat.

### AVALUADOR DE TECNOLOGIA SANITÀRIA I GARANT DE COMPLIMENT

Davant la irrupció de tecnologies de captura, el farmacèutic té l'oportunitat de participar en l'avaluació tècnica, econòmica i logística. A més, ha de cooperar en el fet que l'hospital compleixi amb les normatives ambientals vigents i futures, actuant com a nexa entre

els requisits legals i la pràctica clínica diària. Això inclou l'anàlisi de la relació cost-efectivitat de les noves tecnologies i la seva integració en els fluxos de treball hospitalaris.

## CONCLUSIONS

La contaminació ambiental generada pels gasos anestèsics és una externalitat negativa del sistema sanitari que ja no podem ignorar. L'evidència científica és aclaparadora i les solucions són tècnicament factibles, clínicament segures i, sovint, econòmicament avantatjoses. La recent restricció del desflurà per part de la Unió Europea marca el final d'una era i l'inici d'una transició obligatòria cap a pràctiques més sostenibles.

En aquest escenari, el farmacèutic hospitalari emergeix com una figura central, un professional amb les competències necessàries per liderar aquest canvi complex. Assumint un rol estratègic com a analista, educador, avaluador i gestor del canvi, pot guiar el seu hospital cap a una anestèsia que no només garanteixi la màxima seguretat per al pacient, sinó que també protegeixi la salut del nostre planeta. Alinear l'excel·lència clínica amb la sostenibilitat ambiental no és només una oportunitat, sinó un imperatiu ètic i professional per a la farmàcia del segle XXI. ■

## Bibliografia

1. Health Care Without Harm. Health Care's Climate Footprint: How the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for action. Arup; 2019.
2. Ryan SM, Nielsen CJ. Global warming potential of inhaled anesthetics: application to clinical use. *Anesth Analg*. 2010 Jul;111(1):92-98.
3. Ravishankara AR, et al. Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. *Science*. 2009 Oct;326(5949):123-125.
4. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland; 2014.
5. Sherman J, et al. Life cycle greenhouse gas emissions of anesthetic drugs. *Anesth Analg*. 2012 May;114(5):1086-1090.
6. McGain F, et al. Carbon footprint of general anaesthesia for laparoscopic cholecystectomy: a life cycle assessment. *Anesthesiology*. 2020 Oct;133(4):770-779.
7. Jones R, et al. The carbon footprint of general anaesthesia: a comparative analysis of intravenous versus inhalational techniques in paediatrics. *Lancet Planet Health*. 2021 Jul;5(7):e410-e418.
8. Martínez Ruíz A, Maroño Boedo MJ, Guereca Gala A, Escontrela Rodríguez BA, Bergese SD. Emisiones Zero. Una responsabilidad compartida. Proyecto captura de gases y reciclado en el Hospital Universitario de Cruces. *Rev Esp Salud Pública*. 2023;97:9 de enero. e202301001.
9. Parlament Europeu i Consell de la Unió Europea. Reglament (UE) 2024/573 sobre els gasos fluorats d'efecte hivernacle. *Diari Oficial de la Unió Europea*, L, 2024/573; 2024.
10. McGain F, et al. The carbon footprint of the operating theatre: a life-cycle assessment. *Br J Anaesth*. 2017 Jun;118(6):830-836.
11. Whitmee S, et al. Safeguarding human health in the Anthropocene epoch: report of The Rockefeller Foundation-Lancet Commission on planetary health. *Lancet*. 2015 Nov;386(10007):1973-2028.