

► Control de la ventilación.

Observatory Teaching learning of Physiology

Autores	Fernando Aryan Díaz Velarde
Afiliación	Departamento de Fisiología, Facultad de Medicina, UNAM
Información del Trabajo	
Recibido	30 de noviembre de 2019
Revisado	03 de diciembre de 2019
Aceptado:	05 de diciembre de 2019
Palabras clave	Apneusis, neumotaxis, centro respiratorio

Resumen

En este resumen se aborda el control nervioso del centro respiratorio, así como los mecanismo de regulación para el control tanto inspiratorio como espiratorio, se da una reseña general de cuales son las estructuras que participan en esta regulación, así como los procesos específicos que realiza cada una de ellas.

* Autor para correspondencia. Tel.: +52 5547128293.

E-mail: shmuely@gmail.com

Revisado por: Samuel Bravo Hurtado

<http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.3564864>

Control de la Ventilación

Desde una perspectiva funcional, el sistema de control ventilatorio consta de tres elementos básicos.

- 1) Sensores → Quimiorreceptores periféricos y centrales y mecanorreceptores pulmonares.
 - Recopilan información y la transmiten al controlador central.
- 2) Controlador central → Centro Respiratorio.
 - Ubicado en el cerebro; integra y coordina la información y envía señales a los efectores.
- 3) Efectores → Músculos respiratorios.
 - Producen cambios en el patrón ventilatorio.

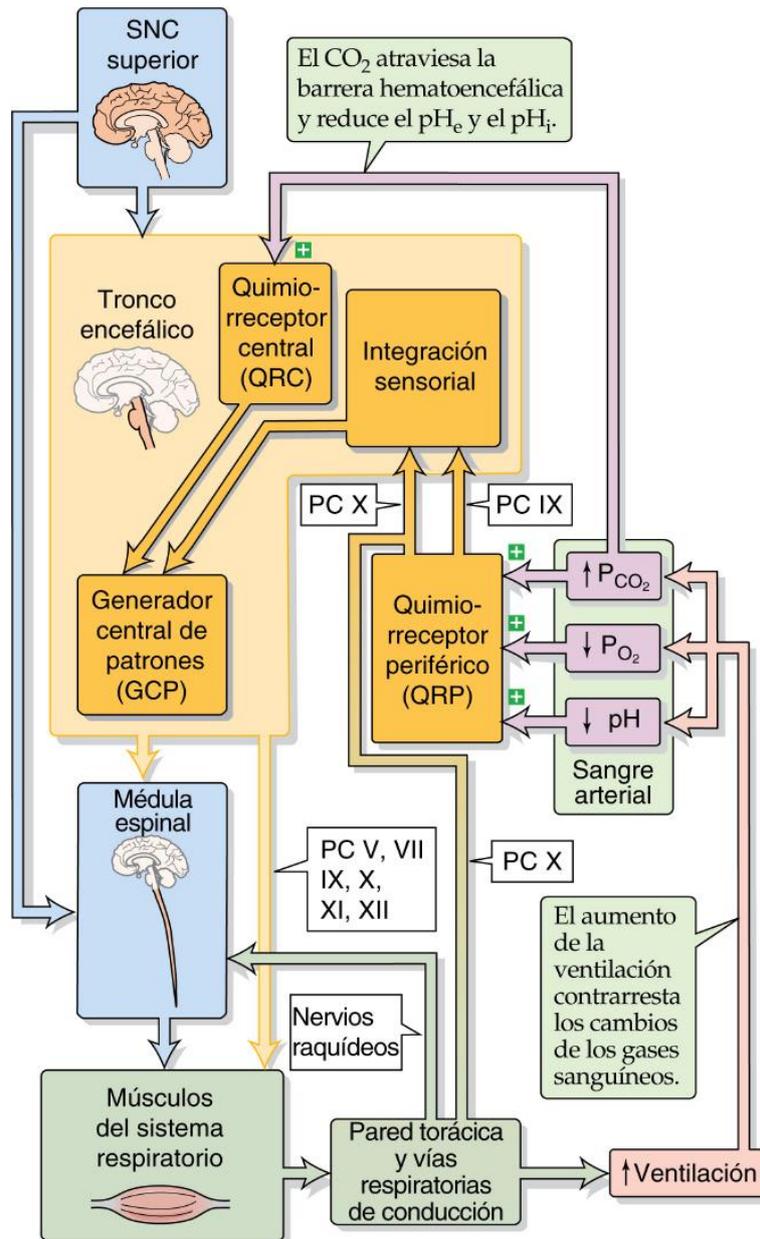


Imagen 1. Regularización de la respiración.

- Las motoneuronas de la médula espinal que estimulan a los músculos respiratorios están controladas por dos vías descendentes principales.
 - Una proveniente de neuronas en los centros de control respiratorio en el bulbo raquídeo que controla la respiración involuntaria
 - Otra de neuronas en la corteza cerebral que controla la respiración voluntaria.

Músculos primarios de la inspiración

- Diafragma ← Nervio frénico ← Núcleos motores frénicos en el asta anterior de la médula espinal (C3-C5).
- Músculos intercostales externos ← Nervios intercostales ← Asta anterior de la médula espinal torácica.

Músculos secundarios de la inspiración

- Laringe y faringe ← Nervios vago (NC X) y glossofaríngeo (NC IX) ← Principalmente núcleo ambiguo.
- Lengua ← Nervio hipogloso (NC XII) ← Núcleo motor del hipogloso.
- Esternocleidomastoideo y trapecio ← Nervio accesorio (NC XI) ← Núcleo del accesorio espinal (C1-C5).
- Narinas ← Nervio facial (NC VII) ← Núcleo motor del facial

Músculos secundarios de la espiración

- Músculos intercostales internos ← Nervios intercostales ← Asta anterior de la médula espinal torácica.
- Músculos abdominales ← Nervios raquídeos ← Asta anterior de la médula espinal lumbar.

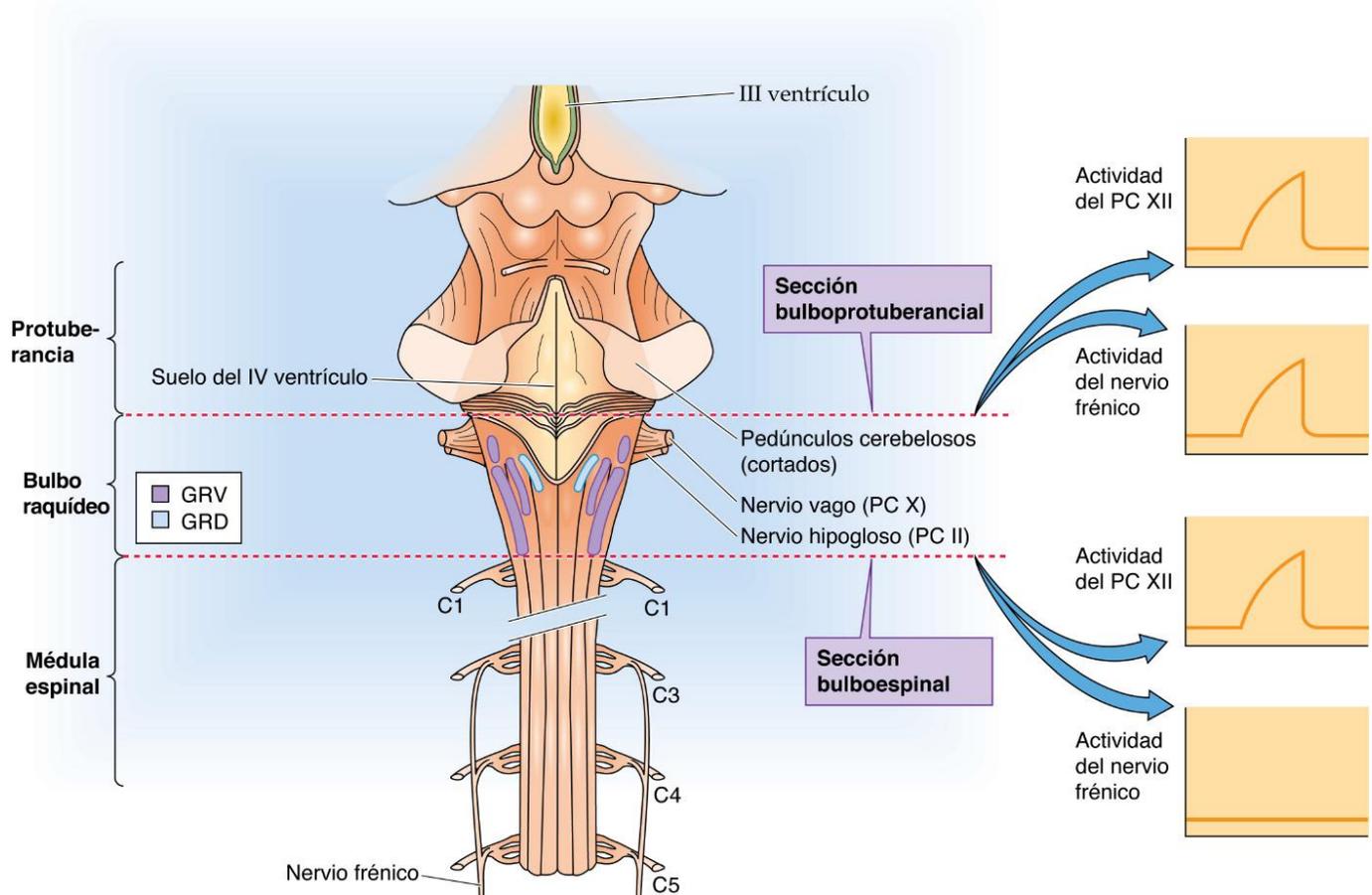


Imagen 2. Efecto de las secciones del tronco encefálico. Vista dorsal del tronco encefálico y la médula espinal, tras haber retirado el cerebelo, y registros de la actividad nerviosa integrada durante un ciclo respiratorio después de la sección indicada. Durante la inspiración la actividad nerviosa integrada (una media de la amplitud y la frecuencia de los potenciales de acción) aumenta en los nervios que van hacia la lengua (es decir, PC XII) y el diafragma (nervio frénico).

- Está formado por varios grupos de neuronas localizadas bilateralmente en el bulbo raquídeo y la protuberancia del tronco encefálico.

Centro Respiratorio Bulbar

- Compuesto por dos grupos de neuronas denominadas el **grupo respiratorio dorsal (GRD)** y el **grupo respiratorio ventral (GRV)**.

Grupo Respiratorio Dorsal (GRD)

- Se extiende a lo largo de aproximadamente un tercio de la longitud del bulbo y está situado de forma bilateral en y alrededor del núcleo del tracto solitario (NTS).
 - El NTS recibe entradas sensoriales procedentes de todas las vísceras del tórax y el abdomen, y tiene una función importante en el control del sistema nervioso autónomo.
 - La porción respiratoria del NTS es ventrolateral al tracto solitario, inmediatamente debajo del suelo del extremo caudal del cuarto ventrículo.
 - Es la terminación sensitiva de los nervios vago (NC X) y glosofaríngeo (NC IX), que transmiten señales sensitivas hacia el centro respiratorio desde:
 - a) Quimiorreceptores periféricos.
 - b) Barorreceptores.

- c) Diversos tipos de receptores de los pulmones.
- Una de sus principales funciones es la integración de la información sensorial procedente del aparato respiratorio.
- Contiene principalmente neuronas inspiratorias.
 - Algunas son interneuronas locales.
 - Otras son neuronas premotoras, que se proyectan directamente hacia diversos grupos de neuronas motoras (principalmente inspiratorias) en la médula espinal y el grupo respiratorio ventral.

Grupo Respiratorio Dorsal (GRD)

- Es ventral al GRD, aproximadamente a mitad de trayecto entre las superficies dorsal y ventral del bulbo. Está en el interior y alrededor de una serie de núcleos que forman una columna de neuronas que se extiende desde la protuberancia hasta casi la médula espinal, por lo tanto, es mucho más largo que el GRD.
- Contiene interneuronas locales y neuronas premotoras inspiratorias y espiratorias.
- La información sensorial relacionada con la función pulmonar llega indirectamente a través del GRD.
- Está formado por tres regiones que desempeñan funciones específicas.
 - GRV rostral o complejo de Bötzing (CBöt)
 - Componente principal → Núcleo retrofacial (NRF) o complejo de Bötzing (CBöt).
 - Contiene interneuronas que dirigen la actividad respiratoria de la región caudal.
 - Actividad dominante → Espiratorio.
 - GRV intermedio
 - Componentes principales → Complejo pre-Bötzing (CpreBöt), núcleo ambiguo (NA) y núcleo paraambiguo (NPA).
 - Contiene neuronas motoras somáticas cuyos axones salen del bulbo con el PC IX y el PC X.
 - Estas fibras inervan la faringe, laringe y otras estructuras, lo que aumenta al máximo el calibre de las vías respiratorias superiores durante la inspiración.
 - Contiene neuronas premotoras que se proyectan hacia neuronas motoras inspiratorias de la médula espinal y el bulbo raquídeo.
 - En el polo rostral hay un grupo de neuronas inspiratorias definidas como el complejo pre-Bötzing.
 - Puede formar parte del Generador Central de Patrones (GCP) respiratorio y contribuye a la generación del ritmo respiratorio.
 - GRV caudal
 - Componente principal → Núcleo retroambiguo (NRA).
 - Contiene neuronas premotoras espiratorias que viajan por la médula espinal hasta establecer sinapsis con neuronas motoras que inervan los músculos accesorios de la espiración.

Centro Respiratorio Pontino

- Aunque las observaciones de Lumsden son frecuentes en la literatura actual, las mantienen tan solo una pequeña parte de los fisiólogos respiratorios:
 - La porción caudal de la protuberancia contiene un **centro apnéustico** → Puede producir apneusis (espasmo inspiratorio prolongado).
 - Envía señales excitadoras al GRD → Activa y prolonga la inspiración → ↓ Frecuencia respiratoria.
 - La porción rostral de la protuberancia contiene un **centro neumotáxico** → Impide la apneusis.
 - También conocido como grupo respiratorio pontino.

- Envía señales inhibitorias al GRD → Desactiva el GRD antes de que los pulmones se llenen demasiado de aire → Acorta la duración de la inspiración → ↑ Frecuencia respiratoria.
- Los términos centro apnéustico y centro neumotáxico generalmente tienen tan solo importancia histórica. Actualmente sabemos que:
 - El centro apnéustico no es un núcleo específico, sino que está distribuido de forma difusa en la porción caudal de la protuberancia.
 - Todavía no conocemos la función del centro apnéustico.
 - Las lesiones de muchos lugares fuera del centro neumotáxico también pueden inducir apneusis.
 - El centro neumotáxico está situado en el núcleo parabraquial medial y el núcleo de Kölliker-Fuse adyacente a él en la parte rostral de la protuberancia.
 - El centro neumotáxico no es el único que previene la apneusis.
 - Las lesiones de muchos lugares fuera del centro neumotáxico también pueden inducir apneusis.

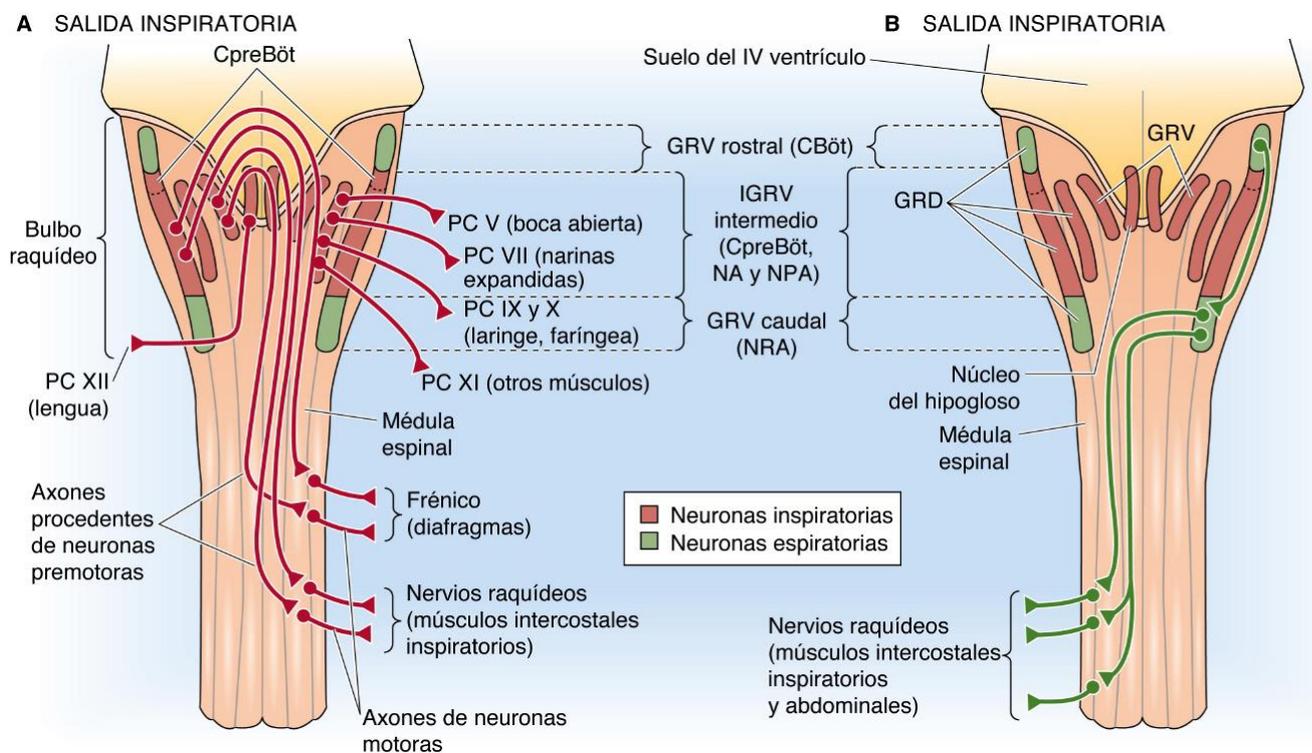


Imagen 3. Grupos respiratorios dorsal y ventral y sus salidas motoras. A, Salidas inspiratorias. B, Salidas espiratorias. Se trata de vistas dorsales del tronco encefálico y la médula espinal, tras haber retirado el cerebelo. El grupo respiratorio dorsal (GRD) incluye el núcleo del tracto solitario (NTS). El grupo respiratorio ventral (GRV) incluye el complejo de Bötzinger (CBöt), el complejo pre-Bötzinger (CpreBöt), el núcleo ambiguo (NA), el núcleo paraambiguo (NPA) y el núcleo retroambiguo (NRA). El código de colores indica si las neuronas son principalmente inspiratorias (rojas) o principalmente espiratorias (verdes).

- En general se pueden clasificar a las neuronas como inspiratorias y espiratorias, aunque cada clase incluye muchos subtipos, según la forma en la que sus patrones de descarga se correlacionan con el ciclo respiratorio.
 - También se pueden subclasificar de acuerdo con sus respuestas a las aferencias, como la insuflación pulmonar y los cambios de la P_{aCO_2} .
- Se han propuesto dos teorías generales sobre el mecanismo del GCP respiratorio.
 - Actividad marcapasos → Los canales iónicos las dotan de propiedades marcapasos.
 - Marcapasos de descarga de espiga única → Descargan de manera repetida una espiga cada vez.
 - Marcapasos de descarga en ráfaga → Descargan de forma repetida ráfagas de espigas cada vez.
 - Los axones de los núcleos del rafe del bulbo raquídeo se proyectan hacia el NTS, donde liberan TRH, y de esta forma podrían inducir la actividad marcapasos del NTS.
 - El principal neurotransmisor liberado por las neuronas del rafe del bulbo raquídeo en las neuronas del CpreBöt es la serotonina.
 - Interacciones sinápticas → Circuitos neurales sin neuronas marcapasos también pueden generar actividades de salida rítmicas.

Actividad Neural Durante el Ciclo Respiratorio

- A nivel del centro de control respiratorio, la inspiración y la espiración comprenden tres fases: una inspiratoria y dos espiratorias.

Inspiración

- Se inicia con un aumento brusco de las descargas de las células del núcleo del tracto solitario, el núcleo retroambiguo y el núcleo paraambiguo, que se siguen de un aumento progresivo a modo de rampa de la frecuencia de disparos.
 - Permite la contracción progresiva de los músculos respiratorios durante la respiración automática.
- Al final de la inspiración, un fenómeno de «apagado» determina una marcada reducción de la frecuencia de disparos en las neuronas y, en este momento, se inicia la espiración.

Espiración

- Durante la primera fase espiratoria (E1, o fase postinspiratoria) puede haber una ráfaga paradójica de actividad en el nervio frénico.
 - Esta ráfaga compensa el elevado retroceso elástico de los pulmones al final de la inspiración.
- Durante la segunda fase espiratoria (E2), el nervio frénico está inactivo.
 - Durante una espiración tranquila, que normalmente es un fenómeno pasivo, los músculos accesorios de la espiración también están inactivos.
 - Sin embargo, durante una espiración forzada, los músculos accesorios de la espiración (es decir, intercostales internos y abdominales) pasan a estar activos durante la E2.

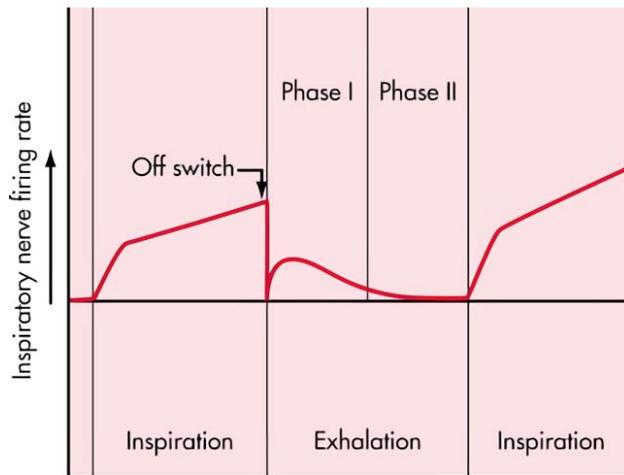


Imagen 4. Señalización de las neuronas inspiratorias durante el ciclo respiratorio.

Regulación del Centro Respiratorio

Corteza Cerebral

- Como la corteza tiene conexiones con el centro respiratorio, podemos modificar en forma voluntaria nuestro patrón respiratorio.
 - Durante períodos breves se puede hiperventilar o hipoventilar hasta tal punto que se pueden producir alteraciones graves de la PCO_2 , del pH y de la PO_2 en la sangre.
- El control voluntario es protector, porque nos permite evitar que ingresen gases irritantes o agua en los pulmones.
- Los potenciales de acción del hipotálamo y el sistema límbico también estimulan el centro respiratorio, lo que permite que estímulos emocionales modifiquen la respiración, como, por ejemplo, al reír o llorar.

Quimiorreceptores

Quimiorreceptores Centrales

- Se encuentran en la superficie ventrolateral del bulbo, cerca del punto de salida de los nervios glossofaríngeo (NC IX) y vago (NC X) y solo a corta distancia del GRD del bulbo raquídeo.
- Son sensibles principalmente a la hipercapnia arterial, que generalmente se manifiesta como acidosis respiratoria. Sin embargo, el parámetro real que se detecta parece ser un pH bajo en las neuronas quimiorreceptoras o el líquido extracelular que los rodea.
- Dado que este líquido extracelular está en contacto con el líquido cefalorraquídeo (LCR), los cambios en el pH del LCR afectan a la ventilación.
- Aunque el LCR se origina en el plasma, su composición no es la misma, porque existe una barrera hematoencefálica entre los dos lugares.
 - La composición del LCR viene condicionada por la actividad metabólica de las células del área circundante y la composición de la sangre.
 - El plexo coroideo determina la composición iónica del LCR mediante la entrada y salida de iones en el LCR.
- La barrera hematoencefálica es relativamente impermeable frente a los iones H^+ y HCO_3^- , pero muestra una importante permeabilidad al CO_2 . Por ello, la PCO_2 en el LCR se comporta de forma paralela a la $PaCO_2$.
 - Sin embargo, la PCO_2 del LCR suele ser unos pocos mmHg superior a la que se observa en la sangre arterial como consecuencia del CO_2 producto del metabolismo de las neuronas.

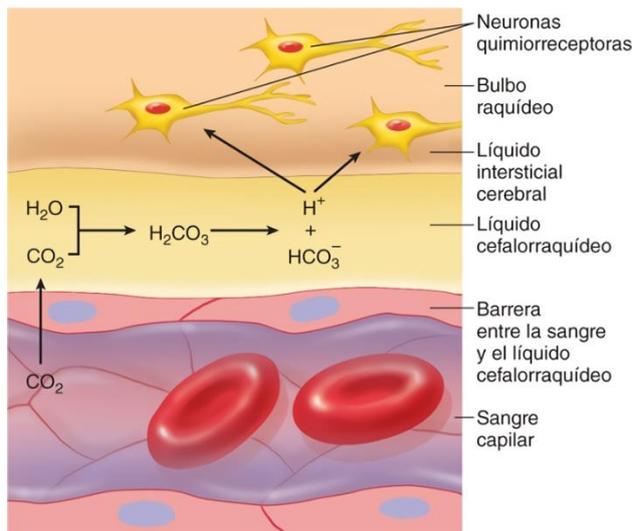


Imagen 5. El CO_2 y la barrera hematoencefálica. El CO_2 arterial atraviesa la barrera hematoencefálica y alcanza rápidamente el equilibrio con el CO_2 del LCR. Los iones H^+ y HCO_3^- atraviesan la barrera de forma más lenta. El CO_2 se combina con H_2O para formar H_2CO_3 arterial, el cual se descompone en H^+ y HCO_3^- .

Quimiorreceptores Periféricos

- El cuerpo tiene dos conjuntos de quimiorreceptores periféricos:
- Los cuerpos carotídeos, situados en la bifurcación de cada una de las arterias carótidas comunes.
 - A través de aferencias del nervio glossofaríngeo (NC IX).
 - Las terminaciones nerviosas del nervio del seno carotídeo (rama del NC IX) están en contacto con las células glómicas del cuerpo carotídeo.
 - Los cuerpos aórticos, dispersos a lo largo de la cara inferior del cayado aórtico.
 - A través de aferencias del nervio vago (NC X).
- La disminución de la PO_2 es el principal estímulo para los quimiorreceptores periféricos.
 - La perfusión del cuerpo carotídeo con sangre que tiene una PO_2 baja (pero una PCO_2 y un pH normales) produce un aumento rápido y reversible de la frecuencia de descarga de los axones del nervio del seno carotídeo.
 - El aumento de la PCO_2 y la disminución del pH también estimulan estos receptores y hacen que sean más sensibles a la hipoxemia.
 - La acidosis respiratoria hace que el cuerpo carotídeo sea más sensible a la hipoxemia, mientras que la alcalosis respiratoria tiene el efecto contrario.
- El cuerpo carotídeo puede detectar hipercapnia en ausencia de hipoxemia o acidosis.
- El cuerpo carotídeo también puede detectar acidosis en ausencia de hipoxemia e hipercapnia.

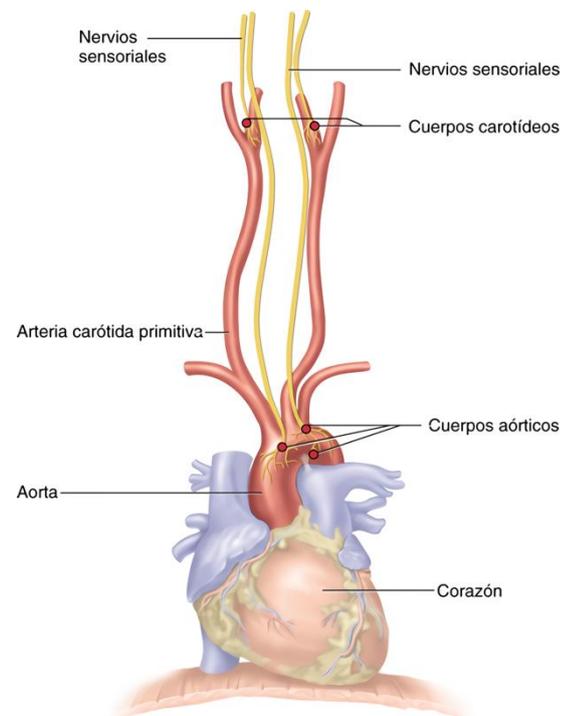


Imagen 6. Control respiratorio por los quimiorreceptores periféricos de los cuerpos carotídeos y aórticos.

Otros Receptores

Estimulación de la Respiración por Propioceptores

- Cuando una persona comienza a ejercitarse, aumentan la frecuencia y la profundidad de su respiración, aun antes de que se produzcan modificaciones de la PO_2 , la PCO_2 o la concentración de H^+ .
- El principal estímulo para estos cambios rápidos del esfuerzo respiratorio son las aferencias de los propioceptores, que controlan el movimiento de las articulaciones y los músculos.

Reflejo de Insuflación

- Este reflejo se denomina reflejo de insuflación o Hering-Breuer.
- Las paredes de los bronquios y los bronquiólos contienen mecanorreceptores, que cuando estos receptores se distienden durante la hiperinsuflación pulmonar, envían potenciales de acción a lo largo de los nervios vagos (X) al GRD en el centro respiratorio bulbar.
 - En respuesta, hay inhibición del GRD, y se relajan el diafragma y los intercostales externos. Por consiguiente, se detiene la inspiración adicional y comienza la espiración.
- En los lactantes, el reflejo parece funcionar durante la respiración normal. En cambio, en los adultos, el reflejo no se activa hasta que el volumen corriente alcanza más de 1500 mL.

Movimientos Respiratorios Modificados

Bostezo

- Es un suspiro exagerado, lleva el volumen pulmonar hasta la capacidad pulmonar total durante varios segundos.
- En el caso extremo se estiran los brazos hacia arriba, se extiende el cuello para elevar la cintura pectoral y se extiende la cabeza, maniobras que aumentan al máximo el volumen pulmonar.

Reflejo Tusígeno

- Es importante para eliminar sustancias extrañas inhaladas del árbol traqueobronquial.
- La sensación de picor que se alivia con la tos es análoga al prurito cutáneo y probablemente esté mediada por receptores de fibras C. Por tanto, la tos es como un rascado respiratorio.

Estornudo

- El estornudo difiere de la tos en que el estornudo casi siempre está precedido por una inspiración profunda. Igual que la tos, el estornudo supone la acumulación inicial de presión intratorácica detrás de la glotis cerrada.
- Al contrario que la tos, en el estornudo se produce constricción de la faringe durante la fase de acumulación y se produce una espiración forzada y explosiva a través de la nariz y también de la boca.
- Esta espiración se acompaña por contracción de los músculos faciales y nasales, de manera que el efecto es desalojar los cuerpos extraños de la mucosa nasal.

Bibliografía:

1. Boron WF, Boulpaep EL. *Fisiología Médica*. 3ª edición. España: Elsevier, 2017.
2. Cloutier, MM. *Respiratory Physiology*. 2nd edition. United States: Elsevier, 2019.
3. Derrickson B. *Fisiología Humana*. 1ª edición. México: Editorial Médica Panamericana, 2019.
4. Fox SI. *Fisiología Humana*. 14ª edición. México: McGraw Hill, 2017.
5. Hall JE. *Guyton y Hall. Tratado de Fisiología Médica*. 13ª edición. España: Elsevier, 2016.
6. Koeppen BM, Stanton BA. *Berne y Levy. Fisiología*. 7ª edición. España: Elsevier, 2018.
7. Raff H, Levitzky M. *Medical Physiology*. 1st edition. United States: McGraw Hill, 2011.

8. Rhoades RA, Bell DR. *Fisiología Médica*. 5ª edición. México: Wolters Kluwer, 2019.