

FISIOLOGÍA RESPIRATORIA

FISIOLOGÍA DE LOS MÚSCULOS DE LA RESPIRACIÓN

PHYSIOLOGY OF THE RESPIRATORY MUSCLES

Klgo. Homero Puppo ^{1,2}, BQ. Ricardo Fernández ³, Klgo. Gonzalo Hidalgo ^{4,5}

- 1.- Kinesiólogo. Master en Atención del Enfermo Respiratorio Crónico Avanzado. Profesor Asociado. Departamento de Kinesiología. Facultad de Medicina, Universidad de Chile.
- 2.- International Physiotherapy Research Network (PhysioEvidence).
- 3.- Bioquímico. Doctor en Ciencias Biológicas con mención en Ciencias Fisiológicas. Profesor Asociado. Departamento de Salud. Universidad de Los Lagos.
- 4.- Kinesiólogo. Instructor. Departamento de Kinesiología. Facultad de Medicina, Universidad de Chile.
- 5.- Integrante del Centro de Investigación e Innovación Biopsicosocial en Enfermedades Crónicas- CIIBEC, Universidad de Las Américas.

INTRODUCCIÓN

El sistema respiratorio se puede dividir en dos componentes esenciales, por un lado, los pulmones, constituidos por las vías aéreas (encargadas de la conducción y acondicionamiento del aire) y el parénquima pulmonar (a cargo del intercambio gaseoso) y por otro lado, la bomba que los ventila (1). La bomba ventilatoria es controlada por los centros respiratorios mediante conexiones nerviosas aferentes y eferentes que se conectan con los músculos respiratorios y la estructura ósea del tórax. Los músculos respiratorios cumplen la función activa de la bomba ventilatoria que permite que un volumen de aire sea movilizado hacia y desde la zona de intercambio gaseoso. En general, la falla a nivel pulmonar provoca hipoxemia con normocapnia o hipocapnia, mientras que la falla de la bomba ventilatoria provoca hipoxemia sumada a hipercapnia, lo que puede ser debido a depresión respiratoria a nivel central, defecto mecánico o fatiga de la musculatura respiratoria (1) (ver figura 1).

Los músculos respiratorios son, morfológica y funcionalmente, músculos estriados

RESUMEN

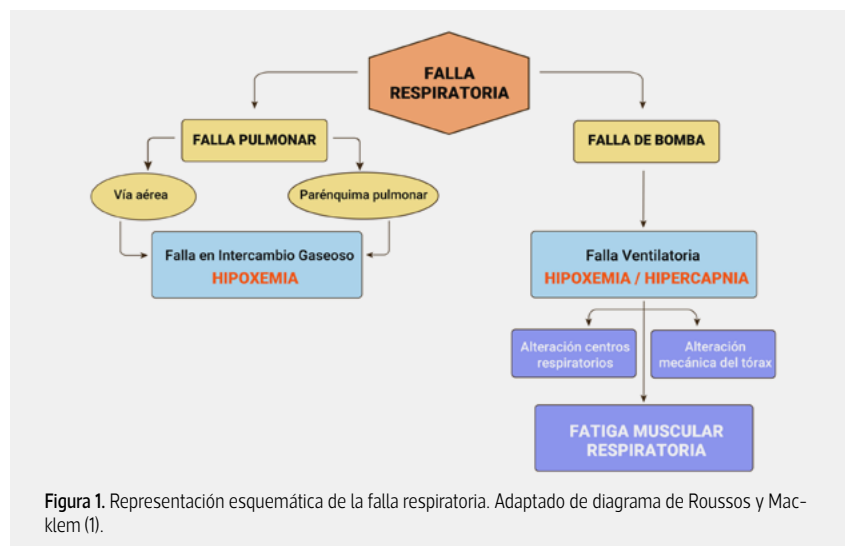
La respiración es un proceso continuo donde los músculos respiratorios tienen un rol central e imprescindible para la vida. Su óptimo funcionamiento involucra diversas estructuras que deben funcionar de forma armónica y coordinada, para que el gasto energético asociado a sus demandas permita aumentos considerables de carga sin afectar mayormente la función esencial de intercambio gaseoso. Comprender la fisiología muscular, desde la base anatómica hasta su comportamiento en el ejercicio y la enfermedad, es fundamental para detectar con anticipación las diversas disfunciones que se producen cuando este equilibrio se descompensa. El objetivo de esta revisión es entregar las bases fisiológicas del comportamiento de la musculatura respiratoria que permitan comprender y aplicar las mejores estrategias de evaluación y tratamiento, cuando la función normal se ve alterada, ya sea por enfermedad, desuso o altas cargas asociadas al ejercicio físico.

Palabras claves: Bomba ventilatoria, diafragma, fibras musculares lentas y rápidas, índice de tensión tiempo, fatiga, metaborreflejo muscular.

ABSTRACT

Breathing is a continuous process where the respiratory muscles have a central and essential role for life. Its optimal operation involves various structures that must work in a harmonious and coordinated way, so that the energy expenditure associated with their demands allows considerable increases in load without significantly affecting the essential function of gas exchange. Understanding muscle physiology, from the anatomical basis to its behavior in exercise and disease, is essential to anticipate the various dysfunctions that can occur when this balance is decompensated. The objective of this review is to provide physiological bases for the behavior of the respiratory muscles that allow understanding and applying the best evaluation and treatment strategies, when its correct functioning is altered, either due to illness, disuse or high loads associated with physical exercise.

Keywords: Ventilatory pump, diaphragm, slow and fast muscle fibers, time tension index, fatigue, muscle metaboreflex.



esqueléticos y realizan la función esencial de mantener la ventilación con un trabajo continuo que permite mantener la vida (2). Esto implica mover una estructura elástica bastante compleja, el tórax, y así lograr la entrada de aire hacia los pulmones y favorecer el intercambio gaseoso. Aunque el diafragma es el músculo principal de la ventilación, son varios los músculos que participan en el acto de respirar, lo que exige que interactúen de manera sincrónica a pesar de su ubicación anatómica, orientación geométrica e inervación motora diferentes. También deben adaptarse a una va-

Autor para correspondencia:

Dr. Ricardo Fernández Acevedo
Av. Fuschlocher 1305 - Osorno, Chile.
rhfdez@gmail.com

riedad de condiciones de trabajo y responder a diversos estímulos químicos y neuronales (3).

La importancia que despierta la comprensión de la función, evaluación, disfunción y entrenamiento de la musculatura respiratoria hace necesario un análisis actualizado de los aspectos fundamentales de su fisiología.

MÚSCULOS RESPIRATORIOS

De acuerdo a su función, podemos diferenciar los músculos respiratorios, en 3 grupos:

1. **Inspiratorios agonistas o primarios de la ventilación**
2. **Accesorios o secundarios de la inspiración**
3. **Espiratorios**

1. Músculos inspiratorios agonistas

El grupo de músculos inspiratorios agonistas incluye el diafragma, los músculos intercostales externos, escalenos e intercostales paraesternales y corresponden a aquellos músculos que actúan en todo momento de la inspiración (4).

El **diafragma** es un músculo esquelético estriado que separa las cavidades torácica y abdominal (5). Al compararlo con músculos periféricos, el diafragma muestra una mayor capacidad oxidativa, mayor densidad capilar y flujo sanguíneo (6). Estos factores le confieren una mayor tolerancia a la fatiga (3). El aporte sanguíneo al diafragma depende de las arterias mamaria interna, intercostales y frénicas (superiores e inferiores) (5). Sus fibras se orientan de forma radial desde su zona central tendinosa a las estructuras óseas de la periferia (4). A su vez, se divide en hemidiafragma derecho e izquierdo, cada uno innervado por un nervio frénico que se origina en las astas ventrales de la médula espinal cervical (raíces nerviosas C3 a C5) (4,5,7). Su forma asemeja a un domo y, considerando su acción mecánica, distribución de tipos de fibras musculares, territorios de unidades motoras, suministro de sangre, origen embrionario y disposición anatómica, puede plantearse que está formado por dos músculos diferentes pero complementarios, el diafragma crural y el costal (1,4,5,8). El diafragma costal se origina en el tendón central, y se inserta en el proceso xifoideo y en la porción interna de los márgenes superiores de las últimas seis costillas, determinando el área de aposición (Figura 2A) (4,5,8). En posición erguida, durante la respiración tranquila, el área de aposición representa aproximadamente un tercio de la superficie total de la caja torácica interna (4). Durante la inspiración a volumen corriente, el diafragma se contrae, su longitud axial disminuye y el domo diafragmático des-

ciende en relación con sus inserciones costales. La altura del área de aposición disminuye, mientras que el domo diafragmático permanece relativamente constante en tamaño y forma. A capacidad inspiratoria máxima, el área de aposición es casi cero (4). El diafragma costal contribuye a la expansión del tórax desplazando el abdomen en sentido anterior y caudal y las costillas inferiores lateralmente y hacia fuera. Cuando la porción costal se contrae ejerce dos tipos de fuerzas a nivel de la caja torácica inferior: la fuerza de aposición y la fuerza de inserción (4,5,8). La **fuerza de aposición** se debe a la transmisión de la presión abdominal a la caja torácica inferior en el área de aposición (Figura 2B) (4,5,8). En cambio, la **fuerza de inserción** está relacionada con las uniones de las fibras musculares de la porción costal del diafragma a las costillas inferiores, debido a que estas fibras corren desde sus uniones en dirección craneal-dorsal, ejercen una fuerza directa orientada cefálicamente sobre estas costillas cuando se contraen (Figura 2C) (4,5,8).

El diafragma crural (o vertebral) también tiene su origen en el tendón central, pero se inserta en la cara ventrolateral de las tres primeras vértebras lumbares y en los ligamentos arqueados aponeuróticos. Los fascículos musculares se organizan en cordones denominados pilares, dos anteriores o principales y dos laterales o secundarios y tiene un agujero a través del cual pasan el esófago y la aorta, mientras que la vena cava pasa a través de un agujero en el tendón central y no tiene vínculo directo con la caja torácica (1,4,5). Los registros electromiográficos simultáneos del diafragma costal y crural humano durante la respiración

voluntaria e involuntaria a diversas intensidades de ventilación, desde volumen corriente hasta ventilación voluntaria máxima, muestran que el aumento en la actividad inspiratoria del diafragma crural es aproximadamente un 40% inferior a la de la porción costal (8). Durante la ventilación, las inserciones de las fibras costales son el punto móvil y la porción crural se considera que actúa como punto fijo (1,4,5). La acción aislada del diafragma crural también aumenta la presión y las dimensiones abdominales, pero no expande la caja torácica (1,5). Hay que hacer notar que la porción crural del diafragma tiene principalmente funciones digestivas (5).

Cuando el diafragma se contrae a lo largo de su eje vertical (cefálico caudal), su movimiento se asemeja al de un pistón, empujando hacia abajo las vísceras, desplazando hacia afuera la pared y provocando el aumento de la presión abdominal (4,8). Dado que estas fibras del diafragma son móviles, es necesario un punto de apoyo para evitar su descenso. Este apoyo es proporcionado por el contenido abdominal y por la pared abdominal anterior (1,4,5). A su vez, el diafragma eleva y expande la caja torácica inferior a través del área de aposición, donde el diafragma costal se encuentra paralelo a la superficie interna de las costillas (1,4,5). El conjunto de acciones descritas produce una expansión de la caja torácica y una reducción de la presión pleural con la consiguiente insuflación de los pulmones que permite el incremento del volumen inspirado (5,8). Así, el diafragma es más eficaz para expandir el tórax a bajo volumen pulmonar que a un volumen pulmonar más elevado (4,5). Esto se debe a que

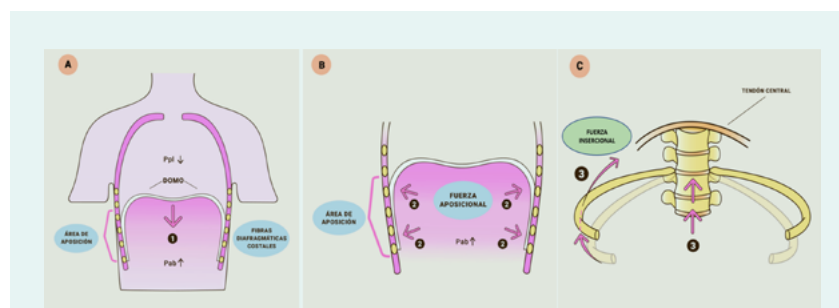


Figura 2. Acciones del diafragma. Área de aposición y resumen de las acciones del diafragma. **2A:** Muestra la inserción de la porción costal del diafragma en los márgenes costales internos de la zona inferior del tórax determinando el área de aposición. Cuando el diafragma se contrae sobre el tendón central, el domo del diafragma desciende aplicando una fuerza de orientación caudal (flecha 1) y aumentando la presión abdominal. **2B:** El área de aposición hace que la caja torácica inferior forme parte del abdomen y los cambios de presión en el espacio pleural entre el diafragma y la caja torácica sean casi iguales a los cambios en la presión abdominal. La presión abdominal se transmite a través del diafragma para expandir la caja torácica inferior: fuerza aposicional (todas las flechas 2). **2C:** Las fibras diafragmáticas costales aplican también una fuerza orientada cefálicamente a los márgenes superiores de las últimas seis costillas inferiores, elevándolas y rotándolas hacia afuera (fuerza de inserción, flechas 3). Elaborado en base a la información contenida en referencias 4,5,8.

el diafragma se comporta similar al resto de los músculos esqueléticos estriados, que son capaces de generar su mayor fuerza cuando están algo elongados y ello sucede cuando el diafragma está cercano a la capacidad residual funcional y mantiene de forma óptima el área de aposición (1,4). En cambio, a volúmenes pulmonares altos, cercanos a la capacidad pulmonar total, la tensión que genera el diafragma es cercana a cero, ya que, a ese nivel de volumen pulmonar, el diafragma alcanza su mayor contracción junto con una reducción significativa del área de aposición (4). Incluso, a un volumen pulmonar alto mantenido (hiperinflación), la contracción diafragmática tiende a desplazar la caja torácica inferior en sentido espiratorio (signo de Hoover) (4,8).

El diafragma está constituido por diversas fibras motoras: de contracción lenta resistentes a la fatiga (fibras S o tipo I) y rápidas (tipo F o tipo II). Las fibras tipo F muestran una resistencia variable, desde resistentes a la fatiga (tipo FR o IIa), intermedias a la fatiga (tipo Flnt o IIx), y fatigables (tipo FF o IIb) (2,7,9). Estas fibras motoras desempeñan un papel importante en el mantenimiento de la ventilación y en otras acciones no ventilatorias. Para funciones ventilatorias como la eupnea o la respuesta a la hipoxia/hipercapnia participan fibras motoras tipo I y IIa (6,7) mientras que en actividades como el toser y el estornudar se reclutan fibras motoras tipo IIx y IIb (7).

El diafragma de individuos mayores de 2 años contiene aproximadamente un 75% de fibras resistentes a la fatiga, 50% de tipo I y 25% de tipo IIa (2,9) (Tabla 1) comparado con el 40% de fibras tipo I de los músculos de las extremidades (6). Es importante recordar que las fibras tipo I están rodeadas por un número mayor de capilares (4 a 5) que las fibras tipo II (a y b) (6). En consecuencia, las fibras tipo I poseen una alta actividad enzimática mitocondrial y baja glucolítica (9).

Como en todo músculo esquelético, la función contráctil tiene dos características fundamentales: la **fuerza**, que depende del número de unidades contráctiles y miofibrillas presentes en el músculo y la **resistencia**, que depende tanto de la densidad de capilares y

mitocondrias, como de la capacidad enzimática oxidativa (2,5,6). El incremento de la fuerza se produce por reclutamiento progresivo de unidades motoras (contracción de baja intensidad) y/o aumento de la tasa de activación de cada unidad (contracción de alta actividad) (2,6). Además de lo anterior, la función contráctil se ve modificada también por la longitud del músculo en reposo, masa muscular, frecuencia del estímulo eléctrico, velocidad de contracción y disposición mecánica (global y de cada componente) (5). Existen tres tipos de relaciones fundamentales para analizar la mecánica muscular: la longitud-tensión, el volumen pulmonar y la forma de la caja torácica. La relación longitud-tensión del diafragma parece similar a la de los músculos de las extremidades. La longitud a la que puede generar el máximo de fuerza es denominada longitud óptima (LO) (6). La relación longitud-tensión del diafragma depende del volumen pulmonar y su LO se ubica en el nivel cercano a la capacidad residual funcional (6). La forma de la caja torácica influye en la longitud del diafragma a cualquier volumen, (4,5) y la tensión que es capaz de generar, disminuye cuando se acorta en forma aguda (ej.: por atrapamiento aéreo dinámico durante una crisis asmática) (4,8).

Los **músculos intercostales externos** se originan en las costillas 1 a 11 y se insertan en las costillas 2 a 12 (5). Sus fibras están orientadas de forma oblicua hacia la línea media anterior y cada espacio intercostal comprende una costilla cefálica y una caudal. Así, la activación conjunta de todos los músculos intercostales externos tienen la capacidad de traccionar la costilla inmediatamente inferior en sentido caudo-cefálico y las rota anteriormente, lo que expande las dimensiones transversales de la caja torácica (4). Estas acciones definen a los intercostales externos como músculos agonistas inspiratorios (4,5). La composición de sus fibras se describe en la Tabla 1.

Los **músculos intercostales paraesternales** corresponden a la porción condroesternal de los músculos intercostales internos. Su acción consiste en producir un estrechamiento de los espacios intercostales y la elevación de las costillas y están activos durante la respira-

ción tranquila, principalmente en posición prona y supina (2,4,5).

Los tres **músculos escalenos**, están innervados por el cuarto, quinto y sexto nervios espinales cervicales (C4-C6). Su contracción eleva la primera y la segunda costilla, lo que contribuye a la expansión de la caja torácica a lo largo del eje anteroposterior, así como el eje cefálico-caudal durante la inspiración tranquila (4,5).

La composición del diafragma y los músculos intercostales cambia significativamente durante los primeros 2 años de vida, donde alcanzan una configuración similar al adulto (10) (Figura 3). El número de fibras musculares de tipo I está directamente relacionado con la edad, lo que puede explicar, al menos en parte, la facilidad de inducir fatiga respiratoria a medida que aumenta el trabajo respiratorio (10). En los recién nacidos prematuros las fibras tipo I son menores a 10% (10), por lo que el trabajo respiratorio es aproximadamente tres veces mayor que el de los adultos y puede aumentar significativamente ante cualquier grado de obstrucción de las vías respiratorias (10). Debido a que las fibras musculares de tipo I brindan la capacidad de realizar contracciones repetidas, cualquier factor que aumente el trabajo respiratorio contribuye a la fatiga temprana de los músculos respiratorios de los lactantes, especialmente si son prematuros (10).

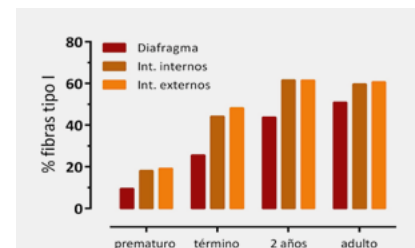


Figura 3. Cambio en la composición de fibras lentas (tipo I) de muestras obtenidas postmortem de los músculos diafragma, intercostales internos e intercostales externos en prematuros (< 35 semanas de gestación), nacidos a término, menores de 2 años y adulto. Graficado a partir de los datos publicados por Keens TG. et al. Referencia 10.

Tabla 1. Composición de fibras musculares respiratorias en el humano adulto.

	Músculos inspiratorios		Músculos espiratorios
	Diafragma costal	Intercostales externos	Intercostales internos
Fibras I (%)	49±3	62±3	64±3
Fibras IIa (%)	28±6	22±2	35±3
Fibras IIb (%)	23±4	17±1	1±1

Elaborado en base a datos publicados por Mizuno M. y Sechner NH. Referencia 9.

2. Músculos accesorios o secundarios de la inspiración

La mayoría de los músculos del cuello, cintura escapular y región superior del tórax participan de la inspiración en circunstancias de alta demanda (4,5). Entre los principales destacados en la literatura se incluyen los esternocleidomastoideos, pectoral mayor, dorsal ancho, músculos de la nariz y de la laringe (4,5).

Los músculos **esternocleidomastoideos** derecho e izquierdo, tienen su origen en la

apófisis mastoides y van a insertarse a la cara ventral del manubrio del esternón y el tercio medial de la clavícula (4). Están inervados por el nervio espinal accesorio (par craneal XI), por lo que, aunque las lesiones de la médula espinal cervical alta provocan la denervación del diafragma, de los intercostales y los escalenos, la inervación del esternocleidomastoideo permanece intacta, lo que lo hace un objetivo importante para el entrenamiento y rehabilitación respiratoria en pacientes con lesión de la médula espinal cervical (4). La contracción simultánea de ambos músculos esternocleidomastoideos elevan las clavículas y el esternón, lo que concuerda con una función inspiratoria accesoria (4,5).

El músculo **dorsal ancho** se extiende desde las últimas cuatro costillas, la cresta ilíaca y las apófisis espinosas de las últimas vértebras torácicas y lumbares hasta la corodera bicipital del húmero. Si se fija su contracción en el húmero, colabora con la elevación de las costillas ayudando en la inspiración (5).

Con la excepción del tabique depresor, todos los **músculos nasales** ayudan a ensanchar la apertura nasal, especialmente durante la respiración dificultosa provocada por una mayor resistencia al flujo de aire nasal, la hipoxemia o la hipercapnia, lo que reduce la resistencia nasal (5). Los **músculos laríngeos** pueden ensanchar o estrechar la apertura gló-

tica y juegan un papel importante en la coordinación de la respiración, en la regulación de la resistencia al flujo de aire, la deglución y el laringoespasma, teniendo una participación central en el mecanismo de la tos (5).

3. Músculos espiratorios

Durante una actividad de baja intensidad sólo los músculos inspiratorios agonistas están activos. Durante un esfuerzo respiratorio elevado (por ejemplo, disnea y ejercicio), los músculos espiratorios también se activan (1,5).

El grupo de músculos espiratorios incluye los abdominales, intercostales internos y el triangular del esternón (5,9). Cuando aumenta la carga de trabajo, los **músculos abdominales** se contraen durante la espiración, con un reclutamiento inicial del músculo transverso del abdomen y el posterior reclutamiento de los otros músculos abdominales produciendo una reducción del volumen torácico y con ello promoviendo una espiración activa (5,6). La contracción de los músculos abdominales mejora el rendimiento del diafragma, ubicándolo en una posición más favorable en su relación longitud-tensión (5). Se considera al transverso del abdomen como el músculo espiratorio principal, siendo su función comprimir el abdomen en sentido cefálico y mover las costillas inferiores en sentido medial (4,6). El trabajo de la respiración a cargas altas se redistribuye en-

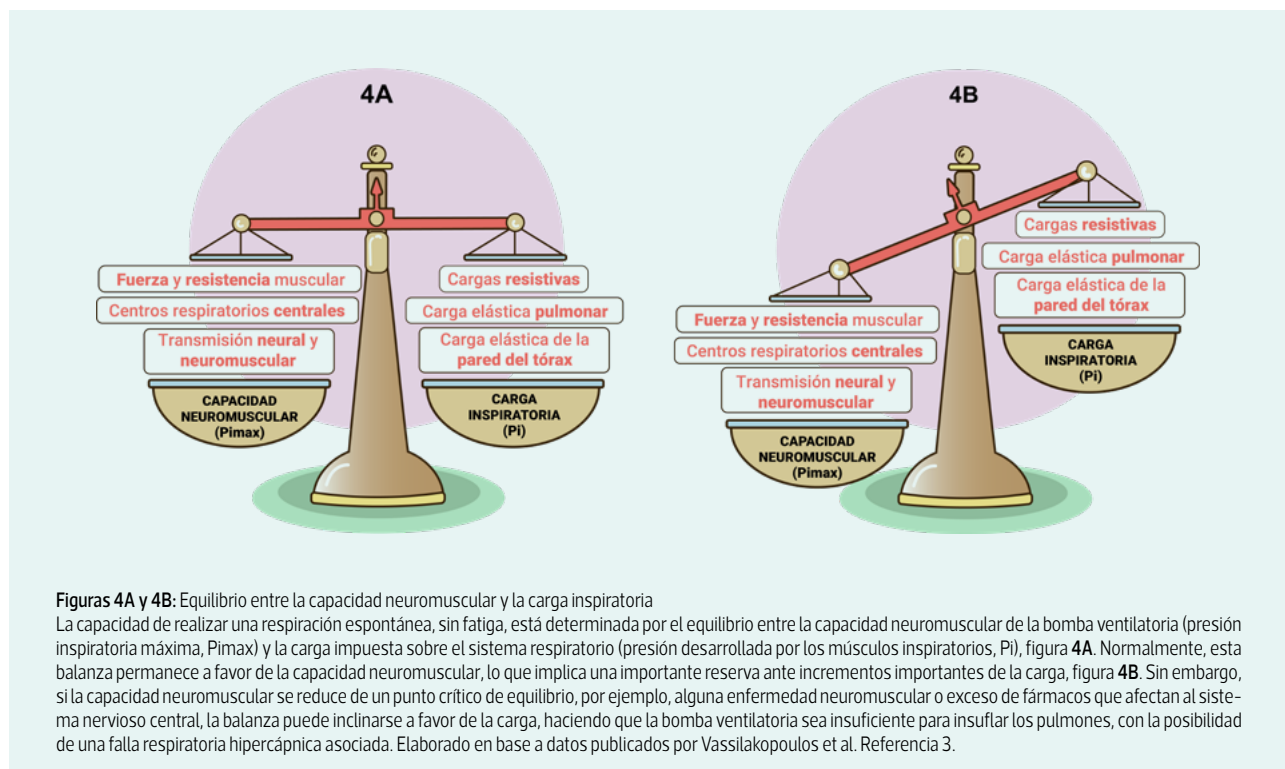
tre los músculos inspiratorios accesorios, músculos abdominales y el diafragma (4,5,8).

Los **músculos intercostales internos** se encuentran debajo de los intercostales externos. Se originan en las costillas 2 a 12 y se insertan en las costillas 1 a 11 (4,5). Cuando se activan, mueven cada costilla en sentido caudal (depresión), lo que disminuye las dimensiones transversales de la caja torácica ejerciendo una acción espiratoria (4,5). Se reclutan cuando existe una demanda espiratoria intensa, durante el ejercicio físico o la tos (5,7). La composición de las distintas fibras que componen los músculos intercostales internos se muestra en la Tabla 1.

El **triangular del esternón** es un músculo plano que al activarse provoca una depresión de las costillas, un desplazamiento cefálico del esternón y un estrechamiento del tórax, lo que aumenta la presión pleural y disminuye el volumen pulmonar, por tanto, tiene una acción espiratoria sobre la caja torácica (4,5).

EQUILIBRIO DE LA CARGA/CAPACIDAD DE LOS MÚSCULOS RESPIRATORIOS PARA SOSTENER LA VENTILACIÓN

Para que un ser humano respire espontáneamente, los músculos inspiratorios deben generar suficiente fuerza para superar las cargas elásticas del parénquima pulmonar



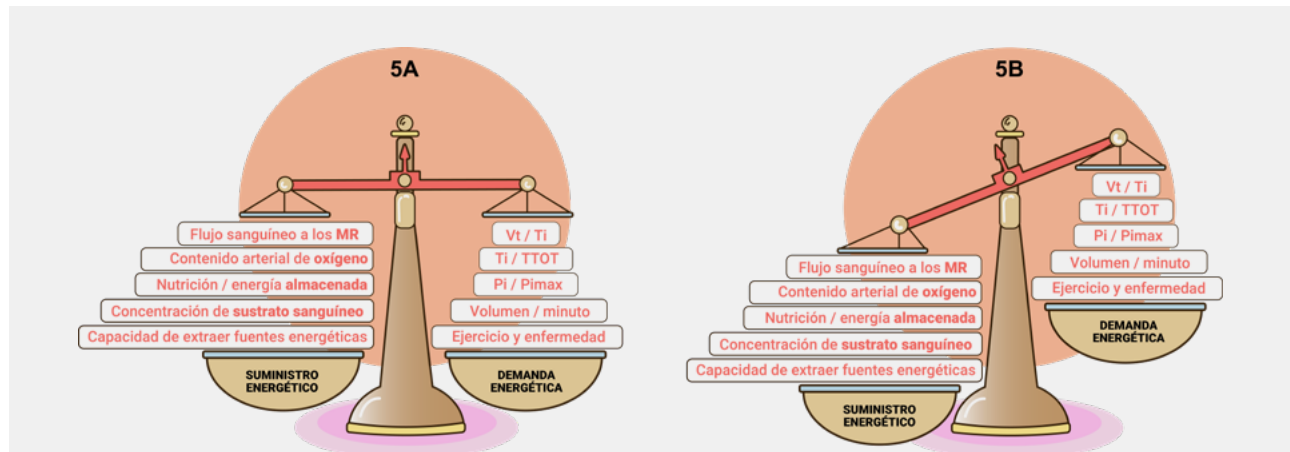


Figura 5A y 5B. Equilibrio entre el suministro y la demanda de energía

La resistencia de los músculos respiratorios está determinada por el equilibrio entre el suministro y la demanda de energía, figura 5A. Normalmente, los suministros satisfacen las demandas y existe una gran reserva, figura 5B. Si el equilibrio se inclina a favor de las demandas, los músculos respiratorios finalmente se fatigan, lo que lleva a una disminución de su capacidad para sostener la respiración espontánea. Elaborado en base a datos publicados por Vassilakopoulos et al. Referencia 3.

Vt/Ti: volumen corriente/tiempo inspiratorio; Ti/TTOT: duración de cada inspiración en relación con la duración total de cada respiración; Pi/Pimax: fuerza ejercida por los músculos respiratorios en cada inspiración en relación con la fuerza total que puede ejercer el sujeto.

y de la pared torácica (elastancia), así como la carga resistiva (resistencia de las vías aéreas y de los tejidos) (3,6). Esto requiere un rendimiento adecuado de los centros que controlan los músculos, integridad nerviosa anatómica y funcional, transmisión neuromuscular intacta, una pared torácica indemne y una fuerza muscular adecuada (7). Esto se puede representar esquemáticamente considerando la capacidad de respirar como un equilibrio entre la carga inspiratoria y la capacidad neuromuscular (Figura 4A) (3). En condiciones normales, este sistema está inclinado a favorecer la capacidad neuromuscular (Figura 4B) (3). Es decir, existen reservas que permiten aumentos considerables de carga sin afectar mayormente la función. Sin embargo, para que un ser humano respire espontáneamente, los músculos inspiratorios deben sostener la carga antes mencionada a lo largo del tiempo, así como ajustar la ventilación por minuto, de manera que exista un intercambio gaseoso adecuado (3,5,6). La capacidad de los músculos respiratorios para sostener esta carga, sin la aparición de fatiga, se denomina resistencia, y está determinada por el equilibrio entre el suministro de energía y las demandas energéticas (Figura 5A) (3). En circunstancias normales, el suministro de energía es suficiente para satisfacer las demandas. Sin embargo, debe existir una reserva energética a la cual se pueda recurrir en circunstancias de mayor demanda (ej.: ejercicio, enfermedad) (3).

Se han diseñado diversos métodos que tratan de evaluar el estado funcional y el riesgo

de desarrollar fatiga de los músculos respiratorios. Estos métodos pueden aplicarse, bien sea en condiciones de sobrecarga ventilatoria o debilidad muscular, tanto en individuos sanos como en pacientes (por ejemplo, enfermedades neuromusculares). Uno de estos métodos es el índice de tensión tiempo muscular, desarrollado por Ramonax et al (11). Este índice, incluye las dos variables que determinan el trabajo muscular: la fuerza generada y el tiempo de duración de esta. Se debe considerar que las demandas de energía aumentan, de forma proporcional, en relación con la presión media ejercida por los músculos inspiratorios por cada respiración (P_i) realizada, que es expresada como una fracción de la presión máxima que el conjunto de los músculos inspiratorios puede desarrollar voluntariamente (P_i/P_{imax}), la ventilación minuto (VE), el tiempo inspiratorio versus la duración del ciclo total ($T_i/TTOT$) y la tasa de flujo inspiratorio medio (V_t/T_i) (6,11,12). Cabe destacar que la duración de la contracción muscular en cada ciclo respiratorio ($T_i/TTOT$) está en estrecha relación el tiempo disponible para la relajación muscular durante la espiración. Cuando este cociente aumenta, hay un menor tiempo para la perfusión correcta de los músculos respiratorios (6,11).

La fatiga muscular es una condición fisiopatológica en la cual disminuyen la fuerza o la velocidad de contracción ante una carga determinada, y característicamente es reversible con el reposo. A diferencia de la anterior, la debilidad muscular es una condición patológica caracterizada por un deterioro funcional del

músculo no reversible con el reposo y que además predispone a la fatiga. La fatiga muscular respiratoria no ocurre en individuos sanos, salvo en condiciones especiales (carrera de maratón o ciclismo de gran fondo). Sin embargo, la fatiga muscular respiratoria puede aparecer, por ejemplo, en enfermedades neuromusculares u otras enfermedades que presenten sobrecarga ventilatoria extrema llevando a la persona a la insuficiencia respiratoria global.

La fatiga se desarrolla cuando las demandas de energía exceden el suministro energético (es decir, cuando el equilibrio está inclinado a favor de las demandas) (3,6). El producto de $T_i/TTOT$ y la presión media del conjunto de los músculos inspiratorios, expresado como una fracción del máximo (P_i/P_{imax}), define un "índice tensión-tiempo muscular" útil (TTImusc) (11), que está relacionado con el tiempo de resistencia, o sea, el tiempo que el conjunto de los músculos inspiratorios puede soportar la carga que se le impone, según la siguiente ecuación:

$$TTImusc = P_i/P_{imax} * T_i/TTOT$$

Siempre que TTImusc sea menor que el valor crítico de 0,45, la carga puede mantenerse por tiempo indefinido, siempre que el tiempo inspiratorio no supere el 40% del total del ciclo respiratorio (11). Pero cuando el TTImusc excede la zona crítica de 0,45, la carga puede sostenerse sólo por un período de tiempo limitado (6,11). En un estudio realizado en Grecia, Dassios y Dimitriou (2019) determinaron

ecuaciones de regresión para la obtención del índice tensión-tiempo muscular TTImusc, en población sana, de entre 6 y 18 años, hombres y mujeres (12).

Debido a que la resistencia está determinada por el equilibrio entre la oferta y la demanda de energía, el TTImusc debe estar de acuerdo con un delicado balance de energía (3,11,12). De hecho, como muestra la Figura 5A la Pi/Pimax y el Ti/TTOT, que constituyen el TTImusc, se encuentran entre los determinantes de las demandas de energía (3). Un aumento en cualquiera de los dos factores aumentará el valor de TTImusc, así como también incrementará las demandas. Lo que determina la relación Pi/Pimax corresponde, en el numerador, a la presión inspiratoria media (Pi) desarrollada en cada respiración y que está determinada por las cargas elásticas y resistivas impuestas a los músculos inspiratorios. El denominador corresponde a la presión inspiratoria máxima (Pimax), que está determinada por la capacidad neuromuscular, es decir, la presión máxima que los músculos inspiratorios puedan lograr voluntariamente (11,12). De ello se deduce que el valor de Pi/Pimax está determinado por el equilibrio entre carga y capacidad neuromuscular (Figura 4A y 4B). Pero como la relación Pi/Pimax también es una de las determinantes de las demandas energéticas (Figura 5A y 5B), los dos equilibrios (es decir, entre capacidad neuromuscular y carga impuesta y entre oferta y demanda de energía) están esencialmente vinculados creando un sistema armónico. De manera tal, que cuando la oferta y la demanda están en equilibrio, la ventilación espontánea se puede mantener indefinidamente (6,11,12). La capacidad de un sujeto para respirar espontáneamente depende de la interacción de diversos factores. Normalmente, esta interacción crea una gran reserva de ventilación para el individuo sano. Cuando los niveles de reserva son sobrepasados por la demanda energética, la ventilación espontánea no se puede mantener por tiempo prolongado y se produce falla ventilatoria (1,3,11).

METABORREFLEJO MUSCULAR

En actividades de alta demanda energética, como el ejercicio, y con el objetivo de garantizar la continuación de la respiración, el organismo restringe el flujo de sangre a las extremidades y lo redirige a los músculos respiratorios con el fin de evitar la fatiga respiratoria producto de la alta demanda que se puede traducir clínicamente en disnea intolerable. La acumulación de metabolitos en los músculos respiratorios en funcionamiento activa aferencias frénicas, lo que induce actividad va-

soconstrictora simpática de las extremidades produciendo con ello una restricción del flujo de sangre con la consiguiente disminución del ejercicio que se está realizando, lo que permite al diafragma disponer de un mayor tiempo de actividad intensa previa a la fatiga. Esta respuesta se denomina metaborreflejo del músculo respiratorio (13). Se ha logrado demostrar, en sujetos sanos, que el entrenamiento específico de la musculatura respiratoria mejora la distribución del flujo sanguíneo a los músculos periféricos durante el ejercicio físico lo que produce un impacto positivo en postergar la fatiga, con el consiguiente aumento del rendimiento (14).

CONCLUSIONES

La actividad muscular respiratoria supone la participación de varios componentes musculares, tanto agonistas inspiratorios, secundarios o accesorios de la inspiración como aquellos músculos necesarios para realizar una espiración activa. El principal agonista inspiratorio es el diafragma y como todos los músculos, está sujeto funcionalmente a las propiedades de fuerza y resistencia inherentes a su condición de músculo esquelético estriado. Ambas características están sujetas a ser modificadas, ya sea producto del deterioro inducido por enfermedades o disfunciones o recuperar/mejorar su rendimiento o eficiencia mecánica y funcional debido a un entrenamiento eficaz y una nutrición adecuada.

Los sujetos sanos tienen la suficiente reserva como para soportar aumentos significativos de la carga sin caer en fatiga y falla ventilatoria. En cambio, la prematuridad, etapas avanzadas de las enfermedades respiratorias crónicas, especialmente neuromusculares con debilidad muscular respiratoria importante en contexto de una condición aguda severa, pueden caer en fatiga con relativa facilidad.

Los músculos esqueléticos humanos poseen un gran potencial de adaptabilidad a una mayor demanda de uso, incluidos cambios en la distribución relativa del tipo y tamaño de fibras, suministro de capilares y características metabólicas. El entrenamiento de resistencia da como resultado una mayor ocurrencia relativa de fibras Ila y un número elevado de capilares por fibra (9). Esta particular "plasticidad" del diafragma y de la musculatura respiratoria en general, nos obliga a dimensionar con atención el impacto, tanto de las posibilidades de evaluar la evolución de su probable deterioro como las posibilidades del entrenamiento específico de los músculos respiratorios, de tal modo de corregir o al menos retardar la aparición de fatiga. Por ello, el conocimiento de la

fisiología de la musculatura respiratoria tiene aquí varios motivos que justifican su comprensión avanzada.

Los autores declaran no presentar conflicto de intereses.

AGRADECIMIENTO

A la Srta. Patricia Toro Ibañez por las figuras realizadas para este artículo.

REFERENCIAS

1. Roussos C, Macklem PT. The respiratory muscles. *N Engl J Med* 1982;307:786-97. doi: 10.1056 / NEJM198209233071304.
2. Polla B, D'Antona G, Bottinelli R, Reggiani C. Respiratory muscle fibres: specialisation and plasticity. *Thorax* 2004;59:808-17. doi:10.1136 / thx.2003.009894.
3. Vassilakopoulos T, Zakynthinos S, Roussos Ch. Respiratory muscles and weaning failure. *Eur Respir J* 1996;9:2383-2400. doi: 10.1183 / 09031936.96.09112383.
4. De Troyer A, Boriek AM. Mechanics of the Respiratory Muscles. *Compr Physiol* 2011;1:1273-1300. doi: 10.1002 / cphy.c100009.
5. Pilarski JQ, Leiter JC, Fregosi RF. Muscles of Breathing: Development, Function, and Patterns of Activation. *Compr Physiol* 2019;9:1025-1080. doi.org/10.1002/cphy.c180008.
6. Orozco-Levi G. El diafragma. *Arch Bronconeumol* 1997;33:399-411. doi: 10.1016 / s0300-2896 (15) 30567-6.
7. Fogarty MJ, Mantilla CB, Sieck GC. Breathing: Motor Control of Diaphragm Muscle. *Physiology* 2018;33:113-126. doi: 10.1152 / fisiol.00002.2018.
8. De Troyer A, Wilson TA. Action of the diaphragm on the rib cage. *J Appl Physiol* 2016;121:391-400. doi: 10.1152 / japplphysiol.00268.2016.
9. Mizuno M. Human respiratory muscles: fibre morphology and capillary supply. *Eur Respir J* 1991;4:587-601.
10. Keens TG, Bryan A CH, Levison H, Ianuzzo CD. Developmental pattern of muscle fiber types in human ventilatory muscles. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1978; 44(6):909-13. https://doi.org/10.1152/jappl.1978.44.6.909.
11. Ramonotxo M, Boulard P, Préfaut C.J. Validation of a noninvasive tension-time index of inspiratory muscles. *J Appl Physiol* (1985) 1995;8:646-53. doi.org/10.1152/jappl.1995.78.2.646.
12. Dassios T, Dimitriou G. Determinants of inspiratory muscle function in healthy children. *J Sport Health Sci* 2019;8:183-188. doi.org/10.1016/j.jshs.2016.08.002.
13. Gama G, Farinatti P, Rangel MVDS, Mira PAC, Laterza MC, Crisafulli A, Borges JP. Muscle metaboreflex adaptations to exercise training in health and disease. *Eur J Appl Physiol [Internet]*. 2021 [cited 2021 Aug 12]. doi: 10.1007/s00421-021-04756-8.
14. Shei RJ. Recent advancements in our understanding of the ergogenic effect of respiratory muscle training in healthy humans: A Systematic Review. *J Strength Cond Res* 2018;32:2665-2676. doi: 10.1519 / JSC.0000000000002730.