



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

PRUEBAS DE FUNCIÓN
RESPIRATORIA EN MEDICINA
OCUPACIONAL

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA
OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN
MEDICINA OCUPACIONAL Y DEL MEDIO
AMBIENTE

VICTOR GUSTAVO VILLAR CABANILLAS

LIMA – PERÚ

2025

ASESOR

Mg. Jesús Arturo Santiani Acosta

JURADO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

MG. GLADYS BERNUY MORENO

PRESIDENTE

MG. MIRKO ROGERS PEZOA VILLANUEVA

VOCAL

MG. HENRY ALEXANDER CUEVA VASQUEZ

SECRETARIO

DEDICATORIA.

A mi esposa, por ser mi compañera incondicional, por su paciencia, amor y apoyo en cada paso de este camino. Su confianza en mí ha sido mi mayor fortaleza y motivación.

A mis padres, quienes con su ejemplo de esfuerzo y perseverancia me enseñaron el valor del trabajo duro y la dedicación. Su apoyo inquebrantable y sus consejos sabios han sido fundamentales en mi crecimiento personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS.

A la Universidad Peruana Cayetano Heredia, por brindarme las herramientas y el conocimiento necesario para seguir creciendo profesionalmente.

A mis compañeros de maestría, por cada aprendizaje compartido, por el apoyo mutuo en los momentos desafiantes y por las experiencias que han enriquecido esta etapa de mi vida. Su compañía ha hecho de este camino un viaje más significativo y gratificante.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO.

Trabajo de investigación Autofinanciado

12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de fuentes excluidas
- ▶ N.º de coincidencia excluida

Fuentes principales

- 11%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de un documento legítimo. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de plagio. Puede deberse a una mala interpretación o a una mala traducción.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN
ABSTRACT

I.	DESARROLLO DE LOS TRABAJOS.....	1
I.1.	Fundamentos Fisiológicos y Normativos en Pruebas de Función Respiratoria	3
I.1.1.	Fundamentos de fisiología respiratoria	3
I.1.2.	Norma y Protocolos sobre pruebas de la Funcion Respiratoria en la Medicina Ocupacional.....	14
I.2.	Pruebas de Función Respiratoria.....	19
I.2.1.	Espirometría	19
I.2.2.	Pruebas derivadas de la espirometría	22
I.2.3.	Prueba de Broncodilatación.....	22
I.2.4.	Prueba de Provocación Bronquial Inespecífica.....	25
I.2.5.	Prueba de Provocación Bronquial Específica	28
I.2.6.	DLCO	30
I.2.7.	Pletismografía Corporal	34
I.2.8.	Oximetría de Pulso	37
I.2.9.	Pruebas de Fracción Exhalada de Óxido Nítrico (FeNO)	39
I.2.10.	Interpretacion integrada de las pruebas de función respiratoria	43
I.3.	Aplicación de las Pruebas de Función Respiratoria en Medicina Ocupacional.....	45
I.3.1.	Vigilancia Médica Ocupacional con Pruebas de Función Pulmonar	45
I.3.2.	Monitoreo de trabajadores expuestos	45
I.3.3.	Uso con fines diagnósticos en Medicina Ocupacional	58
II.	CONCLUSIONES	66
III.	RECOMENDACIONES	69
IV.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

RESUMEN

Las pruebas de función respiratoria son herramientas frecuentemente utilizadas en medicina ocupacional para la detección, monitoreo y diagnóstico de enfermedades respiratorias en trabajadores vulnerables al empleo de contaminantes inhalables. Con el objetivo de revisar sucintamente los conceptos fisiológicos, normativos y de aplicación de las pruebas respiratorias en el medio laboral, en una primera aproximación, la presente revisión narrativa ha permitido describir la espirometría, la DLCO, la pletismografía corporal, la oximetría de pulso y la medición de FENO. Desde el punto de vista de la normatividad, se pueden encontrar similitudes y diferencias al comparar las regulaciones peruanas con las de Estados Unidos, la Unión Europea, Asia y África. Por ejemplo, mientras en el primero coinciden en la utilización del examen en sectores con abuso del riesgo laboral, tal inspección no es obligatoria en países desarrollados. En adición, cabe destacar la relevancia del monitoreo en riesgo y la utilización de pruebas de función en la VMO y en la aptitud. En términos generales, se infiere que el uso informado de pruebas es imprescindible para la prevención y promoción de la salud respiratoria en el trabajo. Como recomendación, se proponen la estandarización, la capacitación y la informatización de registros para que sean más centrales en las políticas de prevención y control.

PALABRAS CLAVE

PRUEBAS DE FUNCIÓN RESPIRATORIA, ENFERMEDADES PROFESIONALES, ENFERMEDADES PULMONARES (DeCS/BIREME)

ABSTRACT

Pulmonary function tests are essential tools in occupational medicine for the detection, monitoring, and diagnosis of respiratory diseases in workers exposed to inhalable contaminants. This narrative review analyzes the physiological and regulatory foundations, as well as the applicability of respiratory tests in the workplace, focusing on spirometry, diffusion capacity of carbon monoxide (DLCO), body plethysmography, pulse oximetry, and fractional exhaled nitric oxide (FeNO). At the regulatory level, this study compares Peru, the United States, the European Union, Asia, and Africa, highlighting similarities in the implementation of respiratory examinations in high-risk sectors, while also identifying differences in test frequency, mandatory requirements, and oversight levels. Additionally, it emphasizes the importance of monitoring exposed workers and the role of respiratory function tests in occupational medical surveillance and fitness-for-work evaluations. The findings conclude that the proper application of these tests is crucial for the prevention of occupational lung diseases and the improvement of respiratory health in the workplace. Strengthening regulatory protocols, professional training, and digital health record management is recommended to enhance the efficacy of these assessments in preventing and controlling occupational respiratory risks.

KEYWORDS

RESPIRATORY FUNCTION TESTS, OCCUPATIONAL DISEASES, LUNG DISEASES (MeSH)

I. DESARROLLO DE LOS TRABAJOS

Las afecciones de salud respiratoria adquirida en el contexto laboral son uno de los segmentos más significativos de las enfermedades crónicas no transmisibles; estos están unidos por la proximidad de la aparición de condiciones peligrosas en el entorno de desarrollo profesional, en tanto los problemas de salud más comunes son neumoconiosis, asma ocupacional, obstrucción crónica de las vías respiratorias, fibrosis pulmonar y patología del pulmón intersticial difusa. Todos ellos causan daños significativos en el aparato respiratorio, limitan de forma independiente y constante al cuerpo en sus facultades, así como las posibilidades cuando las personas se ven obligadas a trabajar en contacto con medios nocivos o condiciones perjudiciales (1,2).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el 13% de los casos de EPOC y el 9% de las incidencias de carcinoma pulmonar están asociados a factores laborales, lo que convierte a estas enfermedades como una de las causas predominantes de minusvalía crónica (1). En 2019, la EPOC fue responsable de 3.23 millones de muertes en el mundo, representando el 6% de todas las defunciones (1). El asma ocupacional, por su parte, es atribuida a entre el 10% y el 25% de los casos de asma en adultos, debido a exposiciones en el lugar de trabajo (2). En cuanto a la fibrosis pulmonar idiopática, su prevalencia mundial se estima entre 13 y 20 casos por cada 100,000 habitantes, con una relación directa con la exposición a sílice y polvo orgánico en actividades industriales y agrícolas (3).

Otras afecciones laborales también impactan la función respiratoria. Se ha identificado que el 37% de los casos de dorsalgia en trabajadores tiene un origen ocupacional, lo que puede restringir la mecánica respiratoria y afectar la capacidad

pulmonar (4). Además, el 8% de los casos de traumatismos laborales tiene consecuencias indirectas sobre la función respiratoria, ya sea por contusiones torácicas o por la exposición a agentes tóxicos en accidentes industriales (1).

En las Américas, se causó 534,242 muertes en 2019, con una tasa ajustada de 35.8 muertes por cada 100,000 personas, según la Organización Panamericana de la Salud (OPS). Los países con las tasas más altas de mortalidad incluyen Honduras (58.7), Argentina (55.5), Haití (50.0), Bolivia (46.9), Nicaragua (43.8), Uruguay (42.4), Estados Unidos (39.1) y Perú (17.6) de muertes por cada 100,000 habitantes (5). En el mismo año, la muerte prematura debido a enfermedades respiratorias ocupacionales alcanzó los 8.9 millones de años, con una mayor afectación en hombres (53%) que en mujeres (47%) (5).

En el contexto peruano, un estudio en 2021 sobre enfermedades ocupacionales en minería entre 2011 y 2020 reportó un total de 37,899 casos en trabajadores mineros, donde la hipoacusia fue la más frecuente (90.74%), seguida de la neumoconiosis (4.94%) e intoxicación por mercurio (0.03%). La afectación predominó en hombres (99.4%), reflejando la composición mayoritaria masculina en el sector minero (6). Por otro lado, los casos de neumoconiosis, atribuida a la implementación de normas de salud ocupacional, la inhalación de sílice y polvo de carbón, a pesar de presentar una disminución progresiva, sigue generando un número significativo de nuevos casos cada año (7).

I.1. Fundamentos Fisiológicos y Normativos en Pruebas de Función Respiratoria

I.1.1. Fundamentos de fisiología respiratoria

La fisiología respiratoria es la disciplina que estudia los mecanismos que regulan la función pulmonar, el intercambio gaseoso y la homeostasis del organismo a través del sistema respiratorio. Este proceso comprende diversas fases, incluyendo la ventilación pulmonar, el transporte de gases en la sangre y la regulación de la respiración, que trabajan de manera integrada para garantizar el equilibrio entre el oxígeno (O₂) y el dióxido de carbono (CO₂) en el cuerpo humano (8).

Dado que la oxigenación tisular adecuada y la eliminación de CO₂ son críticas para la función celular y metabólica, cualquier trastorno de la fisiología respiratoria amenaza con alterar la homeostasis ácido-base y conducir a complicaciones sistémicas (8).

El sistema respiratorio tiene dos componentes funcionales primarios: el sistema de vías respiratorias superior e inferior y el sistema de unidades alveolocapilares. El primer componente se compone de la cavidad nasal, la faringe, la laringe, la tráquea, los bronquios y los bronquiolos. El sistema de vías respiratorias superiores e inferiores transporta aire a los alvéolos. La cavidad nasal y la faringe filtran, humedecen y calientan el aire inspirado, mientras que la tráquea y los bronquios actúan como conducto para garantizar que el oxígeno llegue a los pulmones. El segundo componente son unidades alveolocapilares, que consisten en un alvéolo pulmonar y un capilar para permitir

alveolocapilar difusión de gas, que explotan la diferencia de presión parcial entre el O₂ en los alveolos y la sangre venosa que llena los capilares pulmonares para llevar a cabo oxigenación y la descarga de CO₂ (8).

El intercambio de aire en los pulmones ocurre gracias a la interacción entre la presión del ambiente, la presión en el interior de la cavidad pleural y la presión en los sacos alveolares, lo que genera diferencias de presión que facilitan el flujo del aire hacia el interior y el exterior del sistema respiratorio. Este proceso se lleva a cabo mediante movimientos específicos denominados respiratorios, los cuales incluyen la inhalación y la exhalación. La primera es una acción activa que implica la contracción del diafragma y los músculos intercostales externos, lo cual ocasiona una expansión del volumen torácico y una reducción de la presión en los sacos alveolares, favoreciendo la entrada de aire. Por otro lado, la exhalación es, en circunstancias normales, un fenómeno pasivo; sin embargo, en situaciones de esfuerzo físico o enfermedad, intervienen otros grupos musculares como los escalenos, los músculos del cuello y los intercostales íntimos (9).

El órgano regulador de la respiración se ubica en una región del sistema nervioso central, específicamente en el tronco del encéfalo, en la médula oblongada y porción de la protuberancia, en esta región junto con otras áreas del encéfalo se procesan e integran señales tanto nerviosas como químicas que determinan la frecuencia y profundidad de la respiración. A su vez, tal regulación responde ante las

modificaciones de la presión parcial del oxígeno y el dióxido de carbón en la sangre arterial, así como ante cambios en el pH, de modo en que el sistema funcione como un todo, capaz de ajustarse a las condiciones fisiológicas requiere para la conservación del equilibrio interno del organismo. Así, concurre un aumento en la velocidad de la respiración, provocado por el aumento de la acidez sanguínea por la elevación de los niveles de dióxido de carbono en sangre, hipercapnia, como en caso de hipoxia también se activará un aumento la ventilación: pulmonar, provocado por los sensores periféricos bulbo protuberanciales ubicados en los cuerpos carotídeos y aórticos (9).

Todo esto forma una complejidad única para la regulación de la vida, en la que un organismo puede ajustarse para diferentes situaciones fisiológicas y patológicas, como la altitud, la actividad física o pulmonar, de tipo obstructivo o restrictivo. Por ejemplo, en enfermedades como la obstrucción crónica de las vías respiratorias o la fibrosis pulmonar, cuando no solo hay trastorno en la mecánica respiratoria, sino también en la función de los sensores químicos, lo que hace que sea más difícil para el cuerpo saturarse de acceso de suficiente oxígeno (9).

Habilidad de exhalación y potencia ventilatoria

La habilidad para exhalación y potencia ventilatoria se mide mediante el índice de expulsión forzada de aire. Este indicador ayuda a evaluar la habilidad de una persona para liberar aire después de una inspiración profunda e intensa. El IEF se representa con un número en subíndice

que indica el tiempo de medición en segundos. Los más empleados incluyen el IEF1 y el IEF6. El primero indica el volumen de aire liberado a lo largo del primer segundo de exhalación forzada y juega un rol clave en la detección de trastornos obstructivos como el asma y la EPOC. Una disminución en este valor denota la existencia de alguna restricción en vías aéreas, la cual complica la liberación de aire y produce un modelo de ventilación propio de dichas alteraciones. A su vez, el IEF6 ha sido propuesto como una alternativa a la CVF, ya que resulta más consistente en sus mediciones y requiere de un menor esfuerzo. En pacientes en estados avanzados de patologías respiratorias, este parámetro permite detectar alteraciones en la ventilación sin necesidad de exhalaciones prolongadas, convirtiéndolo así en un recurso valioso para la evaluación clínica de grupos vulnerables. Su análisis se realiza en función de comparaciones con valores de referencia normalizados conforme a factores como edad, género, altura y peso, lo que permite establecer la presencia y severidad de una obstrucción en el funcionamiento respiratorio. En el ámbito médico o laboral, la relación entre IEF1 y CVF resulta un criterio diagnóstico fundamental, ya que cuando este porcentaje es inferior al 70%, existe evidencia de obstrucción de conductos respiratorios, característico de la EPOC (9).

Potencia de la musculatura encargada de la respiración.

Un factor que considera la potencia de los músculos en cuestión es la sincronización de los responsables de la inspiración y la espiración. La

combinación de la acción de estos dos grupos musculares es excelente ya que se necesita presión para permitir el flujo de aire en el aparato respiratorio. Cuando una o ambas facetas no funcionan correctamente, la acción de la entrada de aire (9).

Se mide a partir de la presión más alta generada por el ser humano en su máxima inhalación y exhalación. La presión máxima inspiratoria corresponde a la presión negativa más alta en la que llega el ser humano en máxima inhalación forzada, reflejando la potencia inspiratoria del diafragma y de los intercostales. Niveles disminuidos puede deberse a debilitamiento de diafragma, patología neuromuscular enfermedad que genere restricción del área pulmonar (9).

Adicionalmente, la mayor presión que se genera al exhalar con esfuerzo, denominada presión espiratoria máxima, mide tanto la capacidad propiamente espiratoria de la parrilla como de los músculos coordinados de la espalda y el abdomen, así como aquellos otros que se comportan como auxiliares de estos últimos. En este sentido, la merma en los valores de PEMax es un indicador de debilidad muscular que puede estar asociado a una serie de enfermedades, como caos neuromusculares, distrofia muscular o situaciones de insuficiencia respiratoria estable prolongada (9).

Por otro lado, la presión máxima durante la espiración permite estimar el mayor nivel de presión positiva que se alcanza en una espiración forzada, de lo cual se desprende la potencia de los músculos abdominales y espiratorio-accesorios. Una reducción en la PEMax se

ha correlacionado con enfermedades que afectan la debilidad muscular, como la distrofia muscular, los trastornos neuromusculares y las insuficiencias respiratorias crónicas y agudas (9).

Estas evaluaciones resultan sumamente valiosas para analizar a individuos con afecciones respiratorias de larga evolución, desórdenes que afectan la función neuromuscular y debilitamiento del diafragma, ya que posibilitan examinar la capacidad del aparato respiratorio para generar presiones adecuadas en cada fase de la ventilación y detectar anomalías que puedan comprometer la respiración espontánea.

En el campo de la salud ocupacional, el análisis del volumen respiratorio forzado y de la potencia de los músculos involucrados en la respiración es esencial en personas que trabajan en entornos con exposición a sustancias contaminantes de aire. La identificación precoz de alteraciones en estos indicadores permite la adopción de estrategias preventivas y la adaptación del ambiente laboral para impedir el avance de patologías pulmonares. Asimismo, su integración en procedimientos de control periódico facilita el seguimiento de los efectos de la exposición a elementos tóxicos sobre la función respiratoria y ayuda a prevenir la discapacidad respiratoria en sectores con altos niveles de riesgo (9).

Volumen respiratorio y sus parámetros estándar.

La medida del aire desplazado en el acto respiratorio es una de las principales maneras de evaluar funcionamiento del sistema, ya que las cifras del parámetro en estudio y sus rangos de normalidad alientan el

análisis del desempeño ventilatorio y sirve como pista para detectar cualquier tipo de irregularidad en este aspecto. Dicho ítem hace referencia al diagnóstico de entidades que conllevan a obstrucción o restricción en la función de pulmonar (8) .

Entre los asuntos críticos, se incluyen las capacidades respiratorias; en particular, se asignan volúmenes pulmonares en los cuales se registra la cantidad de aire participando en las distintas fases del proceso ventilatorio. De estos, uno de los más importantes es el volumen tidal; este en particular, es el volumen obtenido por una respiración en estado basal, y se estima en el grupo de referencia para adultos en 500 mL. Se trata de un indicador de la ventilación en situaciones normales, y cualquier variación en el mismo puede ser un signo de anomalías en la función pulmonar o problemas en la dinámica respiratoria (8).

Otra dimensión importante es la cantidad adicional de aire que podría agarrar el organismo después de una inhalación regular; es decir, después de una exhalación regular: el volumen de reserva inspiratorio, que en un cuerpo sano es de aproximadamente 3000 ml, lo que permite una mayor adquisición de oxígeno cuando esto es necesario: cuando el organismo tiene una actividad física intensa o cuando disminuye el contenido de oxígeno en el aire (10).

Igualmente, el volumen residual de expiración corresponde al aire extra dejado luego de una exhalación normal. Al respecto, su medición asciende a 1100 mL y cualquier descenso en la cifra puede evidenciar

una disminución en la elasticidad pulmonar o una afección tipo restrictiva (10).

Por su parte, el volumen remanente y la cantidad de aire que sigue en los pulmones tras una expiración total. Su promedio es de 1200 ml. es crucial para preservar la consistencia de los alvéolos y protege el colapso del pulmón, con lo que el intercambio de gases es posible incluso al final de la respiración (8). Las modificaciones en el volumen residual pueden asociarse a trastornos obstructivos tales como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, en los cuales la retención de aire provoca un incremento del parámetro mencionado. Además de los volúmenes pulmonares, es posible hablar acerca de capacidades pulmonares que, como se mencionaba previamente, son el resultado de la adición de diferentes volúmenes y son igualmente indispensables a la hora de realizar un diagnóstico por espirometría. Una de ellas es la capacidad respiratoria total, que equivale a la combinación del volumen de reserva inspiratoria, el volumen tidal y el volumen de reserva expiratoria, y constituye la cantidad máxima de aire que un individuo puede desplazar en un ciclo respiratorio completo. Este parámetro posee un valor promedio de 4600mL y es uno de los indicadores claves de la capacidad funcional pulmonar, ya que su disminución fácil puede indicar una posible patología restrictiva, tal como la fibrosis (10) .

En el caso del volumen total que pueden contener los pulmones, hay que entender la suma de todos los compartimentos de aire en los pulmones, que abarque tanto la cantidad de aire movilizada como la que

persiste en los bronquios después de una exhalación forzada completa. En los adultos, la cantidad oscila alrededor de los 5800 ml, este indicador refleja la capacidad de los pulmones y las vías aéreas, es decir, su límite de expansión, y, en un contexto de patologías obstructivas, al aumentar, se relaciona con una sobre distensión de los pulmones (11).

La capacidad inspiratoria es el máximo de aire que una persona puede inhalar después de una exhalación habitual. La capacidad de inhalación se obtiene al sumar el volumen de respiración habitual y el volumen adicional de la inspiración, viene alrededor de 3500 ml. Es necesario para el análisis de enfermedades que limitan la capacidad pulmonar. Una disminución en este indicador es causada por la falta de elasticidad del tejido pulmonar que contiene aire. Esto se reduce debido a la disminución de la potencia de los músculos que respiran activamente (11).

La CFR o capacidad funcional residual hace referencia al volumen de aire que permanece en los pulmones una vez se realiza una exhalación corriente. Para tal calcularse, es la suma de VR y VRE, con un promedio de 2300 mL. Es fundamental para el intercambio de gases porque permite una ventilación superior al evitar que la presión en los alvéolos se modifique bruscamente durante la respiración. (9)

Resulta importante mencionar que estos parámetros varían según factores fisiológicos como la edad, el género, la altura y la masa corporal; por lo que, estos temas se compararán bajo valores de

referencia específicos para cada individuo. Además, las capacidades analizadas son modificables tranquilamente con ciertas condiciones patológicas; esto resalta la importancia de medir estas capacidades al evaluar a los pacientes con trastornos de la respiración. Resumiendo, la consideración de los volúmenes y capacidades pulmonares es necesaria para una valoración adecuada de la función respiratoria. Destacar estos parámetros le permite identificar la obstrucción y restricción bronquios, además de ventilarlo y hacer una reclamación temprana sobre la prevención de la aparición de enfermedades; y consecuentemente, apoyar la elección en el campo de la práctica clínica y ocupacional.

Relevancia médica de la fisiología respiratoria

El análisis de la función respiratoria es de gran ayuda para realizar una evaluación, diagnóstico y tratamiento adecuado de las enfermedades pulmonares, permitiendo tener un análisis claro de la ventilación y localización de alteraciones de la mecánica respiratoria. Las pruebas de función pulmonar se utilizan comúnmente para las enfermedades obstructivas y restrictivas, proporcionando información precisa del desplazamiento del aire y cambio gaseoso pulmonar (11).

En ese sentido, el volumen espiratorio forzado en el primer segundo de espiración y la proporción del VEF1 respecto de la capacidad vital forzada CVF son los parámetros claves para determinar los patrones de la respiración. La reducción del VEF1 y el VEF1/CVF por debajo del 70% indican un patrón obstructivo, el cual se evidencia en enfermedades como Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica y

asma. Sin embargo, la proporcional disminución del VEF1 y CVF indica un patrón restrictivo, el cual se observa en la fibrosis pulmonar y las enfermedades pulmonares intersticiales difusas (11).

Además de su utilidad en el diagnóstico, las evaluaciones de la función pulmonar posibilitan el seguimiento del avance de enfermedades respiratorias crónicas. En trastornos como la EPOC, el asma y la fibrosis pulmonar, la medición regular de los volúmenes pulmonares y la respuesta a los tratamientos farmacológicos es esencial para valorar el progreso de la enfermedad y ajustar la terapia. La aplicación de broncodilatadores y programas de rehabilitación pulmonar puede favorecer la capacidad respiratoria y el bienestar, por lo que la medición del VEF1 y la CVF en distintos momentos del tratamiento permite ajustar las intervenciones médicas de manera más efectiva (11).

Otro aspecto relevante es la evaluación de la respuesta a terapias respiratorias, ya que la comparación de mediciones pre y post-administración de broncodilatadores permite determinar la reversibilidad de la obstrucción bronquial. En este contexto, un incremento del VEF1 igual o superior al 12 % tras la administración del broncodilatador es indicativo de una respuesta positiva al tratamiento, lo que ayuda a diferenciar entre el asma, que suele ser reversible, y la EPOC, que generalmente presenta un patrón no reversible (3).

Los avances logrados en los últimos años en la evaluación de la función pulmonar han mejorado significativamente la precisión. A través del desarrollo de ecuaciones de referencia urbanas con respecto a la raza y

la implementación de nuevas tecnologías en espirometría y pletismografía, es posible abordar valores más precisos y comparables en diferentes poblaciones reduciendo los prejuicios al interpretar los resultados. Aunque esto representa un avance significativo, es necesario llevar a cabo más estudios para estandarizar estos logros en poblaciones con diferentes características fisiológicas y ambientales, a fin de lograr una evaluación más justa y precisa en la práctica clínica y ocupacional.

(9)

Como resultado, la fisiología respiratoria es un procedimiento altamente regulado y coordinado. Responsable de la interacción de diferentes sistemas, asegura no solo el intercambio gaseoso, sino también el mantenimiento del equilibrio ácido-base, y por lo tanto para llevar a cabo la adaptación a cambios en la demanda metabólica. La comprensión de estos mecanismos es fundamental en la medicina ocupacional y clínica, ya que permite la evaluación del impacto de factores ambientales, laborales y patológicos. En la actividad pulmonar, facilitando la identificación y el tratamiento de diversas patologías.

I.1.2. Norma y Protocolos sobre pruebas de la Función Respiratoria en la Medicina Ocupacional

La legislación peruana sobre seguridad y salud en el trabajo ofrece al médico del trabajo un marco detallado y vinculante para evaluar las medidas de la función pulmonar en los trabajadores expuestos a factores de riesgo. La Ley N.º 29783 y más específicamente el Decreto Supremo N.º 005-2012-TR requiere la administración de exámenes médicos

ocupacionales que, entre otras pruebas, contienen espirometrías, para rastrear enfermedades pulmonares ocupacionales (12). Tanto estas normativas como las anteriores, son proporcionales a los parámetros internacionales, al establecer que estas revisiones sean parciales y de manera paralela se vayan realizando pruebas clínicas, considerando la matriz IPERC y el riesgo asociado. Además, La Resolución Ministerial N.º 312-2011/MINSA dispone de lineamientos técnicos para realizar pruebas de función pulmonar, enfocándose en la detección de neumoconiosis, asma ocupacional y enfermedad pulmonar obstrucción crónica (13).

Al contrario del estado en otras naciones de la región, en Perú la legislación se ha fortalecido con un enfoque comprensivo, es decir que, además de establecer la periodicidad de las pruebas médicas según el nivel de exposición, se regula el carácter de los registros sobre la salud de los trabajadores en el espacio laboral. Al respecto, el Decreto Supremo N.º 001-2021-TR fortalece la frecuencia con la que se le hacen las pruebas respiratorias en sectores con alta dosis de contaminantes, con el fin de promover también la formación continua del personal médico para el mismo fin (14). Sin embargo, un aspecto que aún representa una limitación en el modelo peruano es el subregistro de enfermedades respiratorias ocupacionales, lo que resalta la necesidad de fortalecer los mecanismos de notificación epidemiológica y mejorar la aplicación de la normativa vigente.

En Estados Unidos, la normativa de seguridad ocupacional, regida por la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) y el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), establece regulaciones similares, con un enfoque más orientado a la protección respiratoria (15). La Ley de Seguridad y Salud Ocupacional de 1970 faculta a OSHA para regular la exposición a agentes tóxicos en el entorno laboral, mientras que el estándar 29 CFR 1910.134 obliga a los empleadores a realizar evaluaciones médicas previas al uso de equipos de protección respiratoria. A diferencia del Perú, en Estados Unidos la espirometría no es obligatoria para todos los trabajadores expuestos, sino que se recomienda cada tres años o con mayor frecuencia, dependiendo del tipo de exposición (16). Un aspecto distintivo de la normativa estadounidense es que NIOSH exige que las pruebas sean administradas por técnicos certificados y con equipos que cumplan con los estándares de la American Thoracic Society (ATS) y la European Respiratory Society (ERS), asegurando la precisión y calidad de los resultados (16).

Una diferencia clave entre ambos marcos normativos es que, mientras en Perú la evaluación respiratoria se estructura dentro de un sistema de monitoreo continuo, en Estados Unidos se prioriza la relación entre la función pulmonar y el uso de equipos de protección respiratoria (15). Sin embargo, a pesar de esta diferencia, ambos países coinciden en la importancia de realizar evaluaciones periódicas en trabajadores

expuestos a partículas inhalables, aunque con cierta flexibilidad en la frecuencia de las pruebas en la normativa estadounidense.

En la Unión Europea, el marco normativo se basa en la Directiva 89/391/CEE, que establece los principios generales de seguridad y salud en el trabajo, y la Directiva 2009/104/CE, que regula la utilización de equipos de protección respiratoria (17). La espirometría es una de las pruebas médicas requeridas en ocupaciones de alto riesgo, especialmente en los sectores químico, minero y manufacturero (17). A diferencia de Perú, donde las disposiciones se encuentran centralizadas en leyes y decretos específicos, la legislación europea delega la aplicación de estos estándares a cada Estado miembro, permitiendo la adaptación de los protocolos según las necesidades nacionales. Esto ha llevado a una variabilidad en la aplicación de pruebas de función pulmonar entre países, con estándares más rigurosos en Alemania y Francia en comparación con naciones del sur de Europa (17).

En Asia, la regulación en materia de salud ocupacional varía según el grado de desarrollo de cada país. En Japón y Corea del Sur, los marcos normativos se alinean con los estándares internacionales y establecen exámenes médicos periódicos que incluyen la espirometría en sectores de alto riesgo (18). Corea del Sur ha reforzado sus controles debido a la pandemia de COVID-19, incorporando monitoreos adicionales en ambientes laborales cerrados (51). En contraste, países como India, Filipinas y Tailandia han implementado normativas de seguridad

ocupacional más generales, sin exigencias específicas sobre pruebas de función pulmonar en todos los sectores laborales (19,20).

En comparación con Perú, los países asiáticos presentan enfoques desiguales en la aplicación de pruebas respiratorias. Mientras que Japón y Corea del Sur han consolidado sistemas de vigilancia con tecnología avanzada y auditorías digitales, en otros países de la región la implementación sigue siendo limitada (18). La falta de infraestructura y de personal médico capacitado ha obstaculizado la estandarización de estos exámenes en industrias de alto riesgo (18).

En África, la regulación sobre pruebas de función pulmonar es aún incipiente y se centra en sectores específicos, como la minería y la manufactura. Sudáfrica cuenta con normativas avanzadas a través de la Occupational Diseases in Mines and Works Act (ODMWA), que exige la realización de espirometrías periódicas en trabajadores expuestos a sílice y otros contaminantes pulmonares (21). Sin embargo, en la mayoría de los países africanos, la vigilancia de enfermedades respiratorias laborales es limitada, con regulaciones fragmentadas y dificultades en la implementación de medidas preventivas (22).

En contraste con Perú, donde las pruebas respiratorias se han incorporado dentro de un marco normativo integral y de aplicación obligatoria, en África la falta de recursos y la informalidad laboral han restringido la efectividad de los controles médicos. La ausencia de bases de datos centralizadas y la falta de supervisión adecuada han

obstaculizado la prevención y detección temprana de enfermedades ocupacionales (22).

En suma, la normativa peruana sobre pruebas de función respiratoria se destaca por su enfoque integral, que combina la evaluación médica obligatoria, la vigilancia epidemiológica y la digitalización de registros de salud ocupacional. En comparación con Estados Unidos y la Unión Europea, donde los estándares son sólidos pero con mayor flexibilidad en la periodicidad de las pruebas, Perú ha establecido un marco normativo que prioriza la vigilancia continua (12,23,24). Asia presenta una disparidad en la implementación de pruebas de función pulmonar, con modelos avanzados en Japón y Corea del Sur, pero limitaciones en otras regiones (18). África, por su parte, enfrenta desafíos estructurales que dificultan la estandarización de estos exámenes (22,21). En este contexto, el modelo peruano puede servir como referencia para países en desarrollo que buscan fortalecer la seguridad y salud ocupacional en materia de enfermedades respiratorias laborales.

I.2. Pruebas de Función Respiratoria

I.2.1. Espirometría

La medición espirométrica es el examen más común para evaluar la habilidad para respirar, y su intención es el diagnóstico de enfermedad pulmonar ocupacional. Dicho de otro modo, le permite medir la cantidad de aire que la persona es capaz de inspirar en un intento especial (25).

Fundamento de la espirometría

Se recoge información sobre la mecánica ventilatoria del paciente, de donde se recoge la cual se determina que la insuficiencia pulmonar puede clasificarse en dos categorías, entre ellas están las afecciones pulmonares obstructivas, que se caracterizan por una disminución del cociente FEV1/FVC; y restrictivas, en las cuales FVC es deficiente (26,27).

Condiciones necesarias para su ejecución

En primer lugar, el paciente debe seguir una lista de indicaciones que incluye no tomar broncodilatadores y no consumir estimulantes antes de la prueba, así como dejar de fumar y comer en las últimas horas. Del mismo modo, el equipo de la cumple con indicaciones de la ATS/ERS sobre los límites de temperatura, humedad y presión atmosférica, que permiten medir con precisión las pruebas y minimiza los errores ambientales. Por último, la calibración del dispositivo es la clave, dado que el dispositivo debe cumplir con la ISO 26782 para ser calibrado periódicamente (26,28).

Indicaciones

Se lleva a cabo cuando se presentan manifestaciones respiratorias: dificultad para respirar, tos prolongada o “ruidos” en el pecho. Esta evaluación facilita la detección de posibles trastornos del sistema respiratorio. Otra indicación para la función pulmonar es la identificación y el monitoreo de enfermedades que afectan el flujo de aire en los bronquios. (26,28).

Contraindicaciones

Consideraciones de seguridad anteriores a la espirometría, aunque el procedimiento de espirometría es seguro, antes de comenzar, es importante evaluar contraindicaciones relativas y absolutas. En cuanto a los primeros, las contraindicaciones cardiovasculares incluyen reciente infarto de miocardio, insuficiencia cardíaca descompensada, hipertensión pulmonar no controlada y arritmias graves. Además, para cualquier contraindicación neurológica y quirúrgica, la espirometría se considera peligrosa para personas con aneurismas cerebrales o intervenciones quirúrgicas oculares con menos de un mes de antigüedad (25).

Procedimiento

Antes de la prueba, se verifica que el paciente haya cumplido con las indicaciones previas, como la suspensión de broncodilatadores si es necesaria, evitando comidas copiosas y el consumo de cafeína. Se registran talla, peso, edad y uso de prótesis dentales si corresponde. El paciente debe adoptar una postura adecuada, con la cabeza ligeramente elevada. Se coloca un clip nasal para evitar fugas de aire y se entrega una boquilla desechable, que debe sellar con los labios sin morderla ni obstruirla con la lengua. Se realizan respiraciones normales para familiarización.

Criterios de aceptabilidad y repetibilidad

Para obtener validez el examen a la metodología debe cumplir con los estándares de calidad definidos por ATS/ERS. Por un lado, el

examinado debe hacer un esfuerzo máximo, para lo cual debe colaborar y comprender las indicaciones para lograr medidas precisas; por otro lado, la prueba debe ser repetible, es decir, al menos tres intentos deben ser aceptables y debe haber una diferencia de menos de 150 ml entre los dos mejores valores de FEV₁ y FVC (25).

Interpretación de los resultados

El patrón restrictivo presenta una FVC reducida con FEV₁/FVC normal o elevada, típica de enfermedades intersticiales o alteraciones de la caja torácica. Su confirmación requiere medición de volúmenes pulmonares (9,25,29).

El patrón no específico muestra una reducción simultánea de FEV₁ y FVC con una relación FEV₁/FVC normal, sin cumplir criterios claros de obstrucción o restricción, requiriendo pruebas adicionales para una evaluación precisa (9,25,29).

Para la espirometría, los softwares más utilizados incluyen Spirotrac, KoKo PFT, EasyOne Connect, WinspiroPRO y BreezeSuite, los cuales analizan la relación FEV₁/FVC y otros parámetros espirométricos, permitiendo la clasificación de patrones obstructivos, restrictivos y mixtos (30,31).

I.2.2. Pruebas derivadas de la espirometría

I.2.3. Prueba de Broncodilatación

Se usa para evaluar la respuesta de la vía aérea a un broncodilatador, midiendo cambios en el volumen espiratorio forzado en un segundo (FEV₁) y la capacidad vital forzada (FVC) (25).

Fundamento de la prueba

Su fundamento radica en determinar la reversibilidad del estrechamiento de la vía aérea en enfermedades como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (25).

Condiciones necesarias para su ejecución

Para su realización, el paciente primero efectúa una espirometría basal con al menos tres maniobras aceptables de FEV1 y FVC. Posteriormente, se administra el broncodilatador en la dosis y vía de administración establecidas por el protocolo de la institución. Luego de un tiempo de espera predefinido, se realizan al menos tres maniobras posbroncodilatador aceptables para evaluar la respuesta (25).

Indicaciones

Las principales indicaciones de la prueba incluyen el diagnóstico y diferenciación de enfermedades obstructivas como el asma y la EPOC, dado que en el asma suele haber una reversibilidad significativa, mientras que en la EPOC la respuesta es más limitada. También se emplea en la evaluación de la gravedad y progresión de estas patologías (25).

Contraindicaciones

Dentro de las absolutas se encuentran el infarto agudo de miocardio en la última semana, las arritmias cardíacas inestables, la hipertensión arterial severa no controlada, la presencia de neumotórax, las cirugías recientes en tórax, abdomen o cerebro y los aneurismas torácicos o

abdominales significativos, dado que la maniobra de espiración forzada podría exacerbar estas condiciones y generar complicaciones (25).

Procedimiento

El procedimiento de la prueba de broncodilatación comienza con una espirometría basal, en la que el paciente debe realizar al menos tres maniobras aceptables y repetibles de FVC y FEV1. Se verifique que la diferencia entre las dos mejores mediciones de FEV1 y FVC no supere los 150 mL en adultos y 100 mL en niños (25).

Tras la medición basal, se administra el broncodilatador en la dosis y vía establecida por el protocolo, generalmente por inhalación mediante un espaciador para optimizar la deposición pulmonar del fármaco. Luego, se espera el tiempo necesario según el tipo de broncodilatador empleado (habitualmente entre 10 y 15 minutos para β 2-agonistas de acción corta y hasta 45 minutos para anticolinérgicos) (25).

Criterios de aceptabilidad y repetibilidad

Para garantizar resultados confiables, cada maniobra debe cumplir con los estándares de calidad establecidos para la espirometría forzada, asegurando que la variabilidad Inter maniobra sea mínima y que la respuesta al broncodilatador refleje cambios fisiológicos reales en la función pulmonar.

En la espirometría prebroncodilatador, el paciente debe realizar al menos tres maniobras aceptables y repetibles de espiración forzada, cumpliendo con los siguientes criterios: la inspiración máxima antes de

la exhalación debe ser completa, evitando pausas prolongadas en la capacidad pulmonar total (TLC) (25).

Interpretación

Se considera una respuesta positiva cuando el FEV1 o la FVC presentan un incremento de al menos un 12% y 200 mL respecto a los valores basales. En pacientes con obstrucción grave, la evaluación del cambio en la FVC puede ser más relevante que la variación en el FEV1. Para evitar sesgos relacionados con el sexo y la talla, se recomienda reportar tanto el cambio absoluto como el porcentaje de cambio respecto a los valores predichos (25,29).

I.2.4. Prueba de Provocación Bronquial Inespecífica

La prueba de provocación bronquial inespecífica evalúa la hiperreactividad de la vía aérea mediante la administración de agentes que inducen una respuesta broncoconstrictora en individuos susceptibles (25).

Fundamento de la prueba

Su fundamento radica en la medición de la reducción en el volumen espiratorio forzado en un segundo (FEV1) tras la exposición progresiva a un agente provocador, como metacolina, histamina o ejercicio, permitiendo diagnosticar asma en pacientes con síntomas respiratorios, pero con espirometría basal normal (25).

Condiciones necesarias para su ejecución

Para su realización, el paciente debe estar en condiciones óptimas, evitando el uso previo de broncodilatadores y fármacos que puedan alterar la respuesta de la vía aérea. Se administra el agente provocador en dosis crecientes bajo estricta supervisión y control de la función pulmonar tras cada administración. La prueba se detiene si el FEV1 disminuye un 20% respecto al valor basal o si el paciente presenta síntomas severos (25).

Indicaciones

La confirmación del diagnóstico de asma en pacientes con síntomas sugestivos pero con pruebas de función pulmonar normal, la evaluación de la hiperreactividad bronquial en casos de asma ocupacional, el seguimiento de la respuesta a tratamientos en pacientes asmáticos y la investigación de síntomas respiratorios recurrentes sin causa identificada (25).

Contraindicaciones

Entre las contraindicaciones absolutas se encuentran el infarto agudo de miocardio reciente, arritmias cardíacas inestables, hipertensión arterial no controlada, neumotórax, cirugía torácica o abdominal reciente y aneurismas torácicos o abdominales (25).

Procedimiento

El paciente debe realizar al menos tres maniobras aceptables y repetibles de FVC y FEV1. Se verifican los criterios de calidad,

asegurando que la diferencia entre las dos mejores mediciones de FEV1 y FVC no supere los 150 mL en adultos y 100 mL en niños (25).

A continuación, se administra el agente provocador, como metacolina o histamina, en dosis progresivas según el protocolo establecido. Después de cada dosis, se realiza una nueva espirometría para medir la respuesta de la vía aérea. La prueba se detiene si el FEV1 disminuye un 20% respecto al valor basal o si el paciente experimenta síntomas graves (25). Posteriormente, si el FEV1 se ha reducido significativamente, se administra un broncodilatador y se repite la espirometría para confirmar la reversibilidad (25).

Criterios de aceptabilidad y repetibilidad

La maniobra de espirometría basal debe incluir tres mediciones aceptables de FEV1 y FVC antes de la administración del agente provocador. Después de cada dosis, se repite la espirometría asegurando que la diferencia entre las dos mejores mediciones de FEV1 no supere los 150 mL en adultos y 100 mL en niños. Se debe registrar la dosis administrada y el tiempo transcurrido entre cada medición (25).

Interpretación

La interpretación de la prueba se basa en la dosis del agente provocador que induce una caída del 20% en el FEV1 (PC20). Un PC20 inferior a 4 mg/mL es indicativo de hiperreactividad bronquial marcada, mientras que valores entre 4 y 16 mg/mL sugieren hiperreactividad leve o moderada. Valores superiores a 16 mg/mL generalmente descartan hiperreactividad significativa (25).

I.2.5. Prueba de Provocación Bronquial Específica

La prueba de provocación bronquial específica evalúa la respuesta de la vía aérea a agentes específicos, como alérgenos o sustancias ocupacionales, para confirmar el diagnóstico de asma inducida por estas exposiciones (25).

Fundamento de la prueba

Su fundamento radica en la inducción controlada de una respuesta broncoconstrictora mediante la inhalación de dosis progresivas del agente sospechoso, midiendo la disminución del volumen espiratorio forzado en un segundo (FEV1) y otros parámetros espirométricos para determinar la sensibilidad del paciente (25).

Condiciones necesarias para su ejecución

Para su realización, el paciente debe estar clínicamente estable y libre de infecciones respiratorias recientes. Se administra el agente específico en dosis crecientes, registrando la función pulmonar tras cada exposición. La prueba se detiene si el FEV1 disminuye un 20% respecto al valor basal o si el paciente presenta síntomas graves (25).

Indicaciones

Las principales indicaciones incluyen el diagnóstico de asma ocupacional o inducida por alérgenos, la evaluación de la reactividad bronquial en trabajadores expuestos a agentes sensibilizantes y la confirmación de hipersensibilidad en contextos clínicos donde la historia ocupacional o ambiental sugiere una relación causal (25).

Contraindicaciones

Las contraindicaciones absolutas incluyen infarto agudo de miocardio reciente, arritmias cardíacas inestables, hipertensión arterial no controlada, neumotórax, cirugía torácica reciente y aneurismas torácicos o abdominales. Las contraindicaciones relativas abarcan infecciones respiratorias agudas, historia de síncope inducido por esfuerzo, enfermedades neuromusculares que impidan la maniobra espirométrica adecuada y embarazo, especialmente en pruebas con alérgenos (25).

Procedimiento

Comienza con la espirometría basal, en la que el paciente debe realizar al menos tres maniobras aceptables y repetibles de Capacidad Vital Forzada (FVC) y Volumen Espiratorio Forzado en el primer segundo (FEV1). La prueba se detiene si el FEV1 disminuye un 20% respecto al valor basal o si el paciente presenta síntomas respiratorios graves.

Criterios de aceptabilidad y repetibilidad

Los criterios de calidad establecidos que la espirometría basal deben incluir al menos tres mediciones aceptables de FEV1 y FVC antes de la administración del agente provocador. Después de cada exposición, se repite la espirometría, asegurando que la diferencia entre las dos mejores mediciones de FEV1 sea menor o igual a 150 mL en adultos y 100 mL en niños (25).

Interpretación

La interpretación de la prueba se basa en la dosis del agente provocador que induce una caída del 20% en el FEV1 (PC20). Un PC20 inferior a 4 mg/mL indica hiperreactividad bronquial significativa, mientras que valores entre 4 y 16 mg/mL sugieren hiperreactividad leve o moderada. Valores superiores a 16 mg/mL generalmente descartan una respuesta significativa. Es esencial contextualizar estos resultados con la historia clínica y la exposición del paciente para una interpretación precisa (25).

I.2.6. DLCO

La DLCO (Capacidad de Difusión del Monóxido de Carbono-CO-), es una prueba que mide cómo los gases pasan a través de la membrana alveolar-capilar, la prueba es de alta demanda, siendo la segunda más solicitada después de la espirometría y la más sencilla de realizar.

Fundamentos de prueba

La DLCO se basa en el primer principio descrito por la Ley de Fick, que describe el movimiento de un gas a través de una barrera biológica, considerando la extensión de la superficie en la que el gas se difunde, la diferencia de presión parcial que se logra a través de la membrana y el espesor de la membrana. (29). Un valor de eficiencia en la difusión pulmonar mantiene una relación con el flujo capilar (30).

Condiciones necesarias para su ejecución

El sujeto evaluado debería permanecer sedentaria durante todas las etapas del proceso de administración para reducir la probabilidad de una variabilidad que puede afectar los resultados. Además, se necesita

ajustar para la hemoglobina, dado que la baja hemoglobina en la sangre venal se asocia con una DLCO severa (29).

Indicaciones

Por tanto, se aplica en el estudio de la hipertensión pulmonar, así como a nivel cardiovascular con síntomas respiratorios; ya que, pueden modificar el flujo sanguíneo en los pulmones y, en función, afectar la difusión de los gases (29).

La otra indicación en el diagnóstico de daño pulmonar causado por sustancias, especialmente en individuos expuestos a sustancias químicas y medicamentos posiblemente dañinos para la función alveolocapilar (29).

Contraindicaciones

Desde las primeras palabras, esta modalidad de DLCO plantea múltiples limitaciones previas que requieren ser pensadas, ya que podrían suponer un daño a la salud del paciente o disminuir la precisión del resultado obtenido (30). A su vez tampoco deberían realizarla los individuos con cirugía torácica o abdominal en las seis semanas previas a la indicación de la DLCO, dada la exigencia del esfuerzo durante la ejecución de la misma y el riesgo que implica para su recuperación (29).

Procedimiento

Antes de iniciar la prueba, se verifican condiciones que pueden afectar la medición, como el ayuno de tabaco y la exposición a monóxido de carbono en las últimas horas, así como la suspensión de oxigenoterapia por al menos 10 minutos antes de la prueba. El paciente debe estar en

una posición cómoda y estable, de preferencia sentado. Se coloca una pinza nasal para evitar fugas y se entrega una boquilla desechable que el paciente debe sellar completamente con los labios sin generar fugas. Se le indica que realice respiraciones normales antes de la maniobra para familiarizarse con el procedimiento (31).

La maniobra de DLCO inicia con la exhalación hasta volumen residual (VR), en la que el paciente debe exhalar de manera pasiva hasta alcanzar su volumen residual para garantizar un inicio estandarizado. Luego, se le indica que realice una inspiración rápida y completa de la mezcla gaseosa, que contiene una cantidad conocida de monóxido de carbono (CO) y un gas trazador inerte (habitualmente helio o metano), hasta alcanzar su capacidad pulmonar total (TLC). A continuación, el paciente debe mantener el sostenimiento de la respiración de manera estable durante un período de 10 ± 2 segundos, evitando realizar maniobras de Valsalva o Müller, ya que podrían afectar la medición. Finalmente, se le indica que realice una exhalación rápida y controlada, recolectando una muestra representativa del gas alveolar en los primeros 4 segundos de la espiración (31).

Criterios de aceptabilidad y repetibilidad

Los criterios de aceptabilidad requieren que el volumen inspirado (VI) sea al menos el 90% de la capacidad vital más grande medida en la misma sesión. Se acepta un VI de al menos el 85% si el volumen alveolar (VA) se encuentra dentro de los 200 mL o el 5% (lo que sea mayor) respecto al VA más grande de maniobras aceptables (21). La

recolección de la muestra alveolar debe completarse en un máximo de 4 segundos después del inicio de la espiración (31).

En cuanto a los criterios de repetibilidad, se requieren al menos dos maniobras aceptables cuyos valores de DLCO no difieran en más de 2 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{mmHg}^{-1}$ ($0,67 \text{ mmol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kPa}^{-1}$). Si solo se obtiene una maniobra de grado A, se reporta ese valor como resultado final (31).

Finalmente, la variabilidad entre pruebas no debe exceder el 10 %, lo que implica que las mediciones repetidas deben mostrar resultados consistentes para validar la fiabilidad del procedimiento (30,29).

Interpretación de la DLCO

Un DLCO disminuido puede estar asociado a alteraciones en la membrana alveolocapilar, como en casos de fibrosis pulmonar o edema pulmonar, donde el engrosamiento de la membrana reduce la transferencia de gases. Asimismo, puede deberse a la pérdida de superficie alveolar, característica del enfisema, o a una reducción del flujo sanguíneo pulmonar, presente en condiciones como la hipertensión pulmonar y la insuficiencia cardíaca. Por otro lado, un DLCO aumentado puede observarse en hemorragias alveolares o en situaciones de incremento del volumen sanguíneo pulmonar, lo que genera una mayor difusión de gases (30,29).

Los softwares como Medisoft ExpAir, Jaeger MasterScreen PFT y Vyntus ONE permiten calcular la capacidad de difusión pulmonar basada en los valores de volumen alveolar y la transferencia de gas,

ajustando los resultados a variables como la hemoglobina y la altitud (35).

I.2.7. Pletismografía Corporal

La pletismografía corporal es una prueba destinada a evaluar la función del sistema respiratorio; permite evaluar la capacidad pulmonar absoluta y la resistencia específica de las vías aéreas (31,32).

Fundamento de la prueba

El principio que fundamenta la visualización del presente examen está sostenido en el postulado de Boyle – Mariotte. Este señala que la magnitud de un gas cambia de manera inversa al aumento o disminución de la presión ejercida sobre el mismo. Así, bajo este razonamiento, la pletismografía permite saber exactamente el volumen gaseoso puesto que no realiza cálculos o aproximaciones después de que un sujeto inhale o exhale. Aprovechando este principio, su uso más perfecto precisa en relación a otros métodos indirectos como la eliminación de nitrógeno (31,32).

Condiciones necesarias para su ejecución

Para realizar la pletismografía de forma correcta, es esencial el uso de un dispositivo calibrado, especialmente de un pletismógrafo que funcione como cámara sellada con control de volumen. De igual forma, la persona evaluada debe encontrarse en reposo activo dentro del compartimento, sentada de manera adecuada y cómoda, así como seguir las indicaciones de la boquilla para inhalar y exhalar, y conservarse con el uso de una pinza nasal (31,32).

Indicaciones

Las líneas generales para este examen incluyen la verificación y la medición de la limitación de la función pulmonar, el análisis de la sobredistensión de los pulmones y la retención de aire en afecciones obstructivas, como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica EPOC y el asma, así como la monitorización de las patologías respiratorias en las investigaciones clínicas o científicas (31,32).

Contraindicaciones

Sin embargo, existen algunas contraindicaciones relativas que deben considerarse antes de realizar la prueba. Entre ellas se encuentran el infarto de miocardio reciente, la insuficiencia cardíaca descompensada, la cirugía torácica o abdominal en las últimas cuatro semanas, la presencia de tuberculosis activa, episodios recientes de hemoptisis o enfermedades infecciosas respiratorias, así como condiciones que impidan la correcta permanencia en la cabina del pletismógrafo, como la claustrofobia o el uso de dispositivos médicos no compatibles con el espacio reducido (31,32).

Procedimiento

Se registra el peso, la talla y otros parámetros antropométricos. Se recomienda evitar el tabaquismo al menos dos horas antes del estudio, no usar prendas ajustadas y evitar ejercicio físico intenso previo a la prueba. El paciente debe estar cómodo, sentado en la cabina pletismográfica con el tórax y el cuello alineados, y los pies apoyados en el suelo. Se coloca una pinza nasal para evitar fugas y se le indica al

paciente que sostenga la boquilla con los labios y los dientes sin morderla ni introducir la lengua. Debe sujetar sus mejillas con ambas manos para evitar movimientos innecesarios de la vía aérea superior. Se le explica la maniobra y se realizan respiraciones normales para la familiarización con el procedimiento (34).

Durante la ejecución de la maniobra de pletismografía, el paciente primero realiza respiraciones a volumen corriente de manera relajada dentro de la cabina hasta alcanzar una capacidad funcional residual (FRC) estable. Posteriormente, se bloquea momentáneamente el flujo de aire en la boquilla mediante la oclusión de la válvula para medir la presión alveolar, fase en la que el paciente debe respirar de manera rápida y superficial, aproximadamente una respiración por segundo. Luego, se le solicita que realice una inspiración máxima, inhalando profundamente y de manera rápida hasta alcanzar su capacidad pulmonar total (TLC). Finalmente, se le indica exhalar de forma pausada y controlada hasta alcanzar una meseta con un cambio de volumen inferior a 25 mL (34).

Criterios de aceptabilidad y repetibilidad

Para garantizar la calidad de la prueba, es fundamental que las maniobras sean repetibles y consistentes. Se requiere obtener al menos tres mediciones aceptables de capacidad funcional residual (FRC_{pleth}) con una variabilidad menor al 5 %, además de una diferencia entre los valores de capacidad pulmonar total (TLC) y volumen residual (RV) dentro de los límites establecidos. La calibración del equipo y la

correcta ejecución por parte del paciente son aspectos determinantes para la fiabilidad de los resultados (31,32).

Interpretación

En cuanto a la interpretación de la prueba, se considera un resultado normal cuando los valores de TLC se encuentran entre el percentil 5 y 95 del valor de referencia, es decir, aproximadamente entre el 80 % y 120 % del valor predicho. Un TLC inferior al 80 % indica restricción pulmonar, cuya severidad varía según el grado de disminución. Por otro lado, una TLC superior al 120 % sugiere hiperinflación pulmonar, mientras que la presencia de un volumen residual elevado es indicativa de atrapamiento aéreo, común en enfermedades obstructivas crónicas (31,32).

I.2.8. Oximetría de Pulso

La oximetría de pulso es un método no invasivo que mide indirectamente la saturación de oxígeno en la sangre arterial (SpO₂) mediante un oxímetro de pulso (33,34).

Fundamento de la prueba

El principio de funcionamiento de la oximetría de pulso se basa en la absorción diferencial de luz por la hemoglobina. El dispositivo emite longitudes de onda en el espectro rojo e infrarrojo a través de los tejidos y mide la cantidad de luz absorbida por la oxihemoglobina y la desoxihemoglobina. Este método permite una medición rápida y confiable de la oxigenación del paciente (33,34).

Condiciones necesarias para su ejecución

Es fundamental que el paciente permanezca en reposo, evitando el movimiento excesivo, ya que esto puede interferir con la señal del dispositivo. Asimismo, factores como la presencia de esmalte de uñas oscuro, temperatura de la piel y perfusión sanguínea pueden afectar la fiabilidad de la medición. Además, el uso de oxímetros certificados garantiza mayor precisión y menor margen de error (33,34).

Indicaciones

Las principales indicaciones para el uso de la oximetría de pulso incluyen la evaluación de pacientes con enfermedades respiratorias crónicas, como EPOC y asma, el monitoreo de la hipoxia silente en patologías como COVID-19, la supervisión de la oxigenación en pacientes hospitalizados o bajo oxigenoterapia, y su empleo en procedimientos anestésicos y quirúrgicos (33,34).

Contraindicaciones

No obstante, existen ciertas contraindicaciones y limitaciones que deben considerarse. Asimismo, la anemia severa o la intoxicación por monóxido de carbono pueden alterar los valores obtenidos, sobrestimando la saturación real de oxígeno en la sangre (33,34).

Criterios de aceptabilidad y repetibilidad

Para que la medición sea válida, es necesario seguir ciertos criterios de calidad. Además, es importante considerar la posición del sensor y evaluar la fuerza de la señal pulsátil antes de interpretar los resultados.

En caso de valores anómalos, se sugiere confirmar los hallazgos con gases arteriales u otros métodos complementarios (33,34).

Interpretación

En condiciones normales, la saturación de oxígeno en sangre (SpO₂) debe encontrarse entre 95 % y 100 % a nivel del mar. Valores inferiores al 94 % pueden sugerir una disminución en la oxigenación, mientras que una SpO₂ menor a 90 % se considera indicativa de hipoxemia significativa, lo que amerita una evaluación clínica más profunda. En pacientes con EPOC u otras enfermedades pulmonares crónicas, los valores normales pueden ser más bajos, estableciendo un umbral de seguridad cercano al 88 % en algunos casos (33,34).

I.2.9. Pruebas de Fracción Exhalada de Óxido Nítrico (FeNO)

Su medición es particularmente útil en el diagnóstico y seguimiento del asma y otras enfermedades respiratorias inflamatorias. Se ha convertido en una herramienta complementaria en la evaluación de pacientes con síntomas persistentes (35,36).

Fundamento de la prueba

El fundamento de la prueba se basa en la medición de la concentración de óxido nítrico (NO) en el aire exhalado. El NO es un mediador gaseoso producido por la óxido nítrico sintasa inducible (iNOS) en el epitelio de las vías respiratorias en respuesta a la inflamación. La cantidad de NO exhalado refleja el grado de inflamación eosinofílica, lo que lo convierte en un biomarcador útil para identificar la presencia de inflamación de tipo 2 (T₂) en enfermedades respiratorias (35,36).

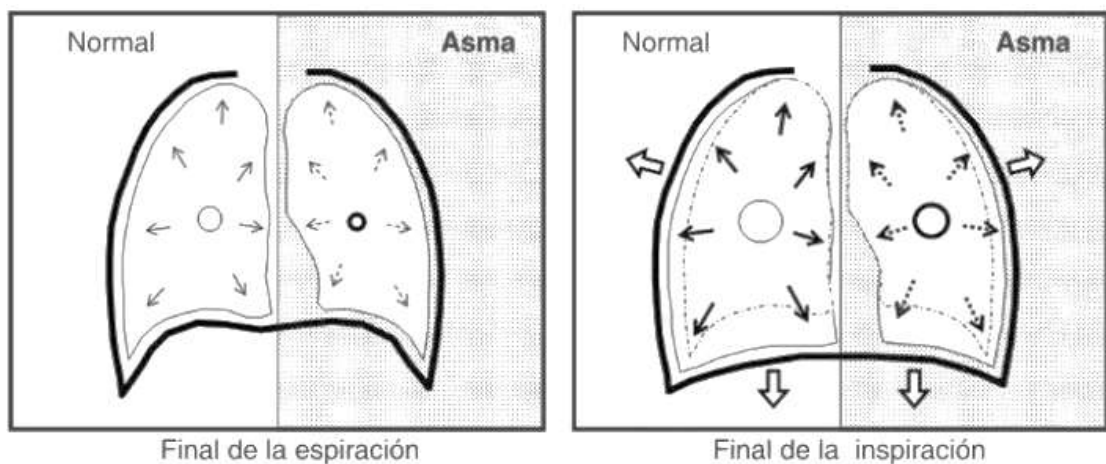
Condiciones necesarias para su ejecución

Para la correcta realización de la prueba, es fundamental que el paciente evite consumir alimentos ricos en nitratos, fumar o realizar ejercicio intenso en las horas previas, ya que estos factores pueden alterar los valores obtenidos. El procedimiento consiste en exhalar aire de forma controlada dentro de un analizador electroquímico o de quimioluminiscencia, asegurando un flujo espiratorio constante para obtener una medición precisa (35,36).

Indicaciones

Las indicaciones principales de la FeNO incluyen su uso para diagnosticar inflamación eosinofílica en la vía aérea, predecir la respuesta al tratamiento con corticosteroides inhalados, monitorear el control de la inflamación en pacientes con asma persistente y evaluar la adherencia terapéutica. (35,36).

Figura 1. Representación visual de cambios en la presión transpulmonar y el diámetro de las vías respiratorias en el ciclo respiratorio.



Fuente: Tomado de Aguilar et al. (37)

Contraindicaciones

A pesar de su utilidad, existen algunas contraindicaciones y limitaciones en la prueba. No se recomienda en pacientes con deficiencias cognitivas o aquellos que no puedan realizar la maniobra correctamente. Asimismo, condiciones como el tabaquismo, infecciones respiratorias recientes o exposición a contaminantes ambientales (35,36).

Procedimiento

Antes de la prueba se recomienda que el paciente evite consumir alimentos ricos en nitratos, como vegetales de hoja verde, y abstenerse de fumar al menos una hora antes de la prueba. Además, debe ser informado sobre la importancia de mantener una respiración controlada y estandarizada durante la medición. Es fundamental que el paciente permanezca en reposo y en un ambiente libre de contaminantes que puedan alterar los resultados (40).

Para la realización de la prueba, el paciente debe inhalar aire limpio sin óxido nítrico (NO) hasta alcanzar su capacidad pulmonar total. Posteriormente, debe exhalar de manera controlada a un flujo constante de 50 ml/s, siguiendo las recomendaciones de la American Thoracic Society (ATS) y la European Respiratory Society (ERS). La exhalación debe realizarse a través de un dispositivo con regulador de flujo, garantizando que la presión bucal se mantenga entre 5 y 20 cmH₂O para evitar la contaminación de la muestra con NO proveniente de la vía nasal (40).

Criterios de aceptabilidad y repetibilidad

Se deben obtener al menos tres mediciones válidas con una variabilidad menor al 10% en valores superiores a 50 ppb y menor al 5% en valores inferiores a este umbral (40).

Para garantizar la validez de la medición de FeNO, se deben cumplir criterios de aceptabilidad y repetibilidad. En cuanto a la aceptabilidad, la exhalación debe ser constante, sin variaciones bruscas en el flujo de aire, y el paciente debe realizar la maniobra correctamente, sin interrupciones ni inhalaciones durante la fase de exhalación. Se recomienda descartar mediciones que presenten artefactos o que sean inconsistentes con el perfil del flujo esperado.

Respecto a la repetibilidad, es necesario realizar al menos tres mediciones válidas, asegurando que la diferencia entre las dos mediciones más cercanas no supere el 10% cuando el FeNO sea mayor de 50 ppb y no más del 5% cuando el FeNO sea inferior a 50 ppb. Si las mediciones no cumplen con este criterio, se deben realizar mediciones adicionales hasta alcanzar la repetibilidad adecuada (40).

A pesar de su utilidad, existen algunas contraindicaciones y limitaciones en la prueba. No se recomienda en pacientes con deficiencias cognitivas o aquellos que no puedan realizar la maniobra correctamente (35,36).

Interpretación

En cuanto a la interpretación de los valores de FeNO, se han establecido puntos de referencia para facilitar su análisis. En adultos, se considera

bajo un FeNO menor a 25 ppb, intermedio entre 25 y 50 ppb y elevado cuando supera los 50 ppb. En niños, estos umbrales son ligeramente menores, con valores de referencia de 20 ppb para niveles bajos y 35 ppb para niveles elevados. Valores elevados de FeNO sugieren inflamación eosinofílica activa y una probable respuesta favorable a los corticosteroides inhalados, mientras que niveles bajos hacen menos probable la presencia de inflamación eosinofílica significativa (35,36).

I.2.10. Interpretación integrada de las pruebas de función respiratoria

En medicina del trabajo, la combinación de pruebas de espirometría con evaluación del volumen y capacidad de difusión pulmonar proporciona una visión general del impacto de los factores ocupacionales en la fisiología pulmonar (30,29).

Las pruebas de broncodilatación y provocación bronquial ayudan a distinguir entre obstrucción reversible (asma) e irreversible (EPOC), así como a detectar hiperreactividad bronquial (25).

Por otro lado, la medición de la capacidad de difusión de monóxido de carbono (DLCO) evalúa la eficiencia del intercambio gaseoso en los alvéolos y se interpreta en conjunto con los volúmenes pulmonares. Una DLCO reducida con volúmenes pulmonares normales sugiere hipertensión pulmonar o enfermedad vascular pulmonar (29,32).

El primero de estos, medición de la capacidad de difusión del monóxido de carbono permite determinar la eficiencia que tiene el pulmón en lo concerniente al intercambio gaseoso. Prueba de respuesta a broncodilatadores, por su parte, sirve para distinguir entre asma y EPOC,

permitiendo evaluar si la obstrucción es reversible, lo que a su vez puede orientar un tratamiento específico con base en la reacción del paciente (31).

En pacientes con obstrucción bronquial, la combinación de la pletismografía con la espirometría ayuda a diferenciar entre un patrón obstructivo simple y una condición mixta con restricción. Además, el análisis del índice RV/TLC y la capacidad inspiratoria (IC) permite evaluar el impacto de la enfermedad en la mecánica pulmonar. En el ámbito ocupacional, la integración de la pletismografía con pruebas de difusión pulmonar y pruebas de provocación bronquial permite un seguimiento más preciso de la función respiratoria en trabajadores expuestos a sustancias nocivas (31,32).

En el contexto clínico, la correlación de la SpO₂ con la frecuencia respiratoria, la presencia de síntomas y los gases arteriales ayuda a tomar decisiones terapéuticas oportunas. En entornos hospitalarios y domiciliarios, el monitoreo continuo con oxímetros confiables puede facilitar la detección temprana de deterioro respiratorio y guiar la administración de oxígeno suplementario cuando sea necesario (33,34).

En pacientes con síntomas respiratorios, la combinación de FeNO con espirometría y medición de eosinófilos en sangre ayuda a diferenciar entre fenotipos asmáticos y otros trastornos respiratorios. En el manejo del asma, la correlación de FeNO con el volumen espiratorio forzado en el primer segundo (FEV₁) y la hiperrespuesta bronquial mejora la precisión diagnóstica y permite ajustar el tratamiento de manera más

eficaz. En pacientes con EPOC, la FeNO elevada puede indicar un componente inflamatorio eosinofílico y guiar el uso de corticosteroides inhalados en subgrupos específicos (35,36).

I.3. Aplicación de las Pruebas de Función Respiratoria en Medicina Ocupacional

I.3.1. Vigilancia Médica Ocupacional con Pruebas de Función Pulmonar

Las pruebas de función respiratoria tienen una aplicación fundamental en el diagnóstico, monitoreo y prevención de enfermedades respiratorias ocupacionales. Además de la detección temprana de deposiciones en la función pulmonar, permiten evaluar la duración de enfermedades ya establecidas y examinar la eficacia de aproximaciones preventivas y terapéuticas (14,16,28).

I.3.2. Monitoreo de trabajadores expuestos

La vigilancia de los factores de riesgo laborales es esencial para determinar si un trabajador está expuesto a condiciones que puedan comprometer su función respiratoria y desarrollar enfermedades ocupacionales. En diferentes países y regiones del mundo, la exposición a contaminantes tanto físicos, químicos y biológicos ha sido identificada como una causa directa del desarrollo de neumoconiosis, asma ocupacional, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y otras patologías en relación. La implementación de programas de monitoreo y control permite evaluar el impacto de estos factores en la salud de los trabajadores y establecer medidas preventivas para minimizar su impacto.

En Perú, sectores como la minería, construcción, agricultura y asistencia sanitaria presentan riesgos elevados de exposición a partículas tóxicas, gases industriales y agentes biológicos. La Ley N.º 29783 de Seguridad y Salud en el Trabajo establece la responsabilidad de los empleadores en la identificación y mitigación de riesgos, garantizando que los trabajadores no desempeñen sus funciones en condiciones que representen un peligro inminente para su salud (28). Estudios como los de Benavides (38) y Gestal (39) han determinado que la clasificación de los factores de riesgo y su vigilancia constante son claves para evitar enfermedades profesionales.

Tabla 1. *Actividades económicas y enfermedades asociadas en Perú*

Actividad Económica	Factores de Riesgo	Enfermedades Asociadas
Minería	- Exposición a sílice y metales pesados - Gases tóxicos como dióxido de azufre y monóxido de carbono	Neumoconiosis, EPOC, Fibrosis pulmonar
Construcción	- Polvo de cemento y asbesto - Exposición a solventes y pinturas - Material particulado	Asma laboral, EPOC, Cáncer pulmonar
Agricultura	- Uso de plaguicidas y agroquímicos - Exposición al polvo agrícola y biomasa	Asma, bronquitis crónica, Neumonitis por hipersensibilidad
Salud (personal sanitario)	- Contacto con virus y bacterias -Exposición a desinfectantes químicos - Malas condiciones de ventilación	Tuberculosis, infecciones respiratorias, asma ocupacional
Industria Química	- Exposición a solventes y gases tóxicos (amoníaco, cloro) - Polvos químicos	Intoxicación química, asma laboral, Neumonitis química

Transporte y logística	-Exposición a contaminantes del tráfico (PM2.5, óxidos de nitrógeno) - Trabajo prolongado en espacios cerrados	Bronquitis crónica, EPOC, Alergias respiratorias
Pesca y procesamiento marino	- Exposición al frío extremo y humedad - Inhalación de biomasa durante la combustión de madera	Bronquitis, Infecciones respiratorias recurrentes
Servicios de Limpieza	- Productos químicos de limpieza (cloro, amoníaco) - Exposición a polvo acumulado	Asma ocupacional, Dermatitis respiratoria, Rinitis alérgica
Fabricación industrial (textil, metal)	- Exposición a fibras sintéticas, partículas metálicas y polvo - Contacto con solventes químicos	Fibrosis pulmonar, Asma ocupacional, Cáncer de pulmón
Servicios de transporte (choferes)	- Exposición prolongada a contaminación vehicular - Sedentarismo prolongado	Bronquitis crónica, EPOC, Hipoventilación pulmonar
Manufactura de productos químicos	- Exposición a gases irritantes y polvos - Contacto con sustancias volátiles	Asma ocupacional, Neumonitis química, Enfermedades alérgicas respiratorias

Fuente: Adaptado del Documento Técnico Protocolos de Exámenes Médico Ocupacionales y Guías de los Exámenes Médicos Obligatorios por Actividad. RM N° 312-2011 MINSA (28).

Los factores físicos como la radiación, temperaturas extremas y ventilación deficiente pueden impactar indirectamente la función pulmonar al favorecer la acumulación de contaminantes en el aire. En la minería y la agricultura, la exposición prolongada al calor y a partículas finas ha sido asociada con un mayor riesgo de bronquitis crónica y neumoconiosis (28). La falta de ventilación adecuada en espacios cerrados, como hospitales y fábricas, incrementa la exposición a

partículas PM2.5 y gases contaminantes, lo que deteriora progresivamente la capacidad respiratoria (28).

Los factores químicos, como la sílice en minería, los gases tóxicos en la industria y los plaguicidas en la agricultura, son altamente nocivos para la salud pulmonar. La inhalación de polvo de sílice es una de las grandes causas de silicosis, una enfermedad progresiva que afecta la función pulmonar de forma irreversible (28). Asimismo, la exposición a óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre y el monóxido de carbono en entornos industriales se ha relacionado con el desarrollo de EPOC y enfermedades obstructivas (28,39). En la agricultura, el uso de plaguicidas y herbicidas sin las medidas adecuadas de protección ha sido identificado como un factor de riesgo en el desarrollo de asma ocupacional y reacciones alérgicas (28).

En el ámbito de los factores biológicos, los trabajadores del sector salud y los agricultores son especialmente vulnerables a la exposición a virus, bacterias y hongos. El personal sanitario enfrenta un alto riesgo de contagio de tuberculosis debido al contacto continuo con pacientes infectados y a la deficiente ventilación de los hospitales (28). En el sector agrícola, la exposición a microorganismos presentes en el suelo ha sido vinculada con enfermedades respiratorias crónicas. Además, en zonas rurales de Perú, el uso de biomasa para cocinar expone a la población a partículas finas que inflaman las vías respiratorias y favorecen la aparición de EPOC (28,39).

Tabla 2. Principales factores de riesgo y enfermedades respiratorias asociadas en América

Sector Laboral	Factor de Riesgo	Patología Asociada
Agricultura	Pesticidas (organofosforados, piretroides)	Asma ocupacional, EPOC
Construcción	Polvo de sílice, asbestos	Bronquitis crónica, EPOC
Procesamiento de Alimentos	Polvo orgánico, alérgenos alimentarios	Asma ocupacional
Minería	Polvo mineral, metales pesados	EPOC, neumoconiosis
Industria Textil	Fibras sintéticas y orgánicas	Asma, bronquitis
Salud	Agentes biológicos (virus, bacterias)	Tuberculosis, neumonitis, asma ocupacional
Transporte	Contaminación por partículas, humo	Bronquitis crónica, asma inducida por contaminantes
Industria Química	Solventes químicos, emisiones tóxicas	Intoxicación química, asma ocupacional
Servicios de Limpieza	Productos químicos de limpieza, desinfectantes	Asma ocupacional, dermatitis respiratoria
Energía (Plantas Eléctricas)	Emisión de partículas, radiación térmica	Bronquitis industrial, irritación pulmonar crónica

Fuente: Enfermedades respiratorias asociadas a distintas actividades, elaborado a partir de Mamane et al. (40), Lytras et al. (41), Pisani et al. (42), y Mejía y Gonzáles (43).

La vigilancia de factores psicosociales y ergonómicos también es clave en la evaluación de riesgos. El estrés laboral ha sido identificado como un factor que puede exacerbar enfermedades crónicas como el asma, debido al aumento en la producción de cortisol (44). Asimismo, las posturas inadecuadas y la carga física excesiva pueden afectar la capacidad respiratoria al restringir la movilidad torácica y la ventilación pulmonar (44).

A nivel global, la vigilancia de estos factores ha demostrado ser determinante para evaluar la exposición de los trabajadores y prevenir enfermedades respiratorias ocupacionales. En América, el asma ocupacional es una de las principales enfermedades relacionadas con el trabajo, con una prevalencia del 9 al 20% en países industrializados, alcanzando hasta el 70% en sectores específicos como la agricultura, minería e industria textil (42). La exposición a pesticidas y contaminantes industriales en países como Canadá y Estados Unidos ha sido relacionada con el aumento de casos de bronquitis crónica y EPOC en trabajadores agrícolas (40). En Brasil y Costa Rica, el contacto prolongado con organofosforados y piretroides ha generado un incremento en enfermedades pulmonares obstructivas, mientras que en Nicaragua, la exposición a paraquat ha sido un factor clave en la aparición de síntomas respiratorios obstructivos (40).

En Europa, la exposición a contaminantes industriales y agrícolas ha sido identificada como un factor de riesgo significativo para enfermedades pulmonares crónicas. Los pesticidas organoclorados, organofosforados y carbamatos han sido asociados con el desarrollo de asma, bronquitis crónica y EPOC en trabajadores agrícolas (40). La inhalación de polvos industriales en la minería y construcción ha sido vinculada con enfermedades como la silicosis y la fibrosis pulmonar (45). Además, la exposición prolongada a humos de soldadura y gases tóxicos ha demostrado generar una reducción progresiva en la función

pulmonar, evidenciada por la disminución de FEV1 y FVC en estudios epidemiológicos (46).

En Asia, los factores de riesgo respiratorio incluyen la exposición a materia particulada PM2.5, metales pesados y químicos industriales. En China, la inhalación de cromo y níquel en fundiciones de acero ha incrementado el riesgo de cáncer pulmonar, mientras que en India, la exposición a fibras de algodón en la industria textil ha elevado los casos de bisinosis, una enfermedad obstructiva crónica (47,48). En Indonesia, los trabajadores de molinos de arroz han mostrado una disminución en la capacidad vital forzada (FVC) y FEV1, lo que confirma el impacto del polvo orgánico en la función pulmonar (48,49).

Tabla 3. Factores de riesgo y efectos en la función respiratoria en industrias de Asia

Industria Afectada	Factor de Riesgo	Efecto en la Función Respiratoria
Agricultura, molinos de arroz	Polvo orgánico	Reducción de FVC y FEV1, asma ocupacional
Minería, construcción	Polvo inorgánico	Neumoconiosis, silicosis, fibrosis pulmonar
Fundiciones de hierro y acero	PM2.5 y metales pesados	Enfermedades obstructivas, cáncer pulmonar
Textil, manufactura	Químicos industriales (VOC, formaldehído)	Bronquitis crónica, enfermedades restrictivas
Multisectorial	Uso limitado de PPE	Incremento en asma ocupacional y bronquitis
Fábricas textiles y manufactura	Ventilación deficiente	Acumulación de partículas, exacerbación de enfermedades

Nota. Factores de riesgo laborales que afectan la función respiratoria, realizado a partir de Subramaniam et al. (50), Khan et al. (51), Rahmani et al. (52), Kumar et al. (53) y Chika (54).

En África, la falta de medidas de protección y monitoreo de la salud ocupacional agrava la situación de los trabajadores expuestos a contaminantes respiratorios. En la minería y construcción, la inhalación de sílice y polvo de carbón ha sido vinculada con el desarrollo de silicosis y enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (55,56). En tenerías de Etiopía, la exposición a químicos tóxicos como las sales de cromo ha generado un aumento en los casos de fibrosis pulmonar y asma ocupacional (57). La falta de equipos de protección personal (EPP) y la deficiente ventilación en espacios laborales han contribuido a una mayor incidencia de bronquitis crónica y EPOC en trabajadores africanos (56). En Perú, el Ministerio de Salud (MINSA) ha implementado programas de prevención y vigilancia específica con el objetivo de reducir la incidencia de enfermedades respiratorias ocupacionales y mejorar la detección temprana de alteraciones en la función pulmonar (106). Entre las estrategias más relevantes se encuentran las evaluaciones periódicas de salud respiratoria dirigidas a trabajadores expuestos a agentes de riesgo, tales como sílice, polvo industrial y humos metálicos. Estas evaluaciones incluyen exámenes complementarios obligatorios, como espirometrías y radiografías torácicas, especialmente en sectores de alto riesgo como la minería y la construcción. Además, se han implementado protocolos de prevención, en los que se establece el uso obligatorio de equipos de protección respiratoria (EPR) y la capacitación en seguridad industrial, con el fin de reducir la exposición a partículas nocivas y prevenir el deterioro de la función pulmonar (58).

No obstante, a pesar de estos esfuerzos, se ha identificado un subregistro significativo de enfermedades respiratorias profesionales, lo que indica la necesidad de fortalecer los mecanismos de notificación y control epidemiológico. La baja notificación de estas patologías sugiere que muchas enfermedades ocupacionales no son diagnosticadas a tiempo o no se registran adecuadamente en los sistemas de vigilancia sanitaria, lo que puede retrasar la implementación de medidas preventivas y de tratamiento oportuno (58).

Los programas de vigilancia médica han identificado que los sectores de minería y manufactura presentan la mayor incidencia de enfermedades respiratorias ocupacionales. En 2021, se notificaron 347,342 evaluaciones médicas ocupacionales, con un predominio de diagnósticos de bronquitis crónica, asma ocupacional y silicosis (58). Estos datos refuerzan la importancia del monitoreo continuo de la función pulmonar en trabajadores expuestos a contaminantes ambientales, lo que permite una detección temprana de alteraciones respiratorias y la aplicación de medidas correctivas en el entorno laboral. Una vez identificados los trabajadores en riesgo, se debe proceder a su monitorización regular a través de pruebas de función pulmonar, cuya comparación a lo largo del tiempo permite detectar la progresión de enfermedades obstructivas o restrictivas. La evaluación periódica de la función respiratoria es clave para adaptar las condiciones laborales y evitar la progresión hacia una invalidez respiratoria (59,60). Para ello,

se han establecido frecuencias específicas de evaluación según el tipo de exposición y el riesgo asociado a cada actividad laboral.

Tabla 4. *Monitoreo según prueba*

Frecuencia de Evaluación	Prueba Aplicada	Población Objetivo
Anual	Espirometría	Mineros y trabajadores de la construcción
Cada 6 meses	DLCO	Trabajadores expuestos a vapores tóxicos
Cada 3 meses	TACAR	Trabajadores con antecedentes de exposición a asbesto

Fuente: Elaboración propia

La frecuencia de evaluación de las pruebas de función respiratoria se basa en los riesgos ocupacionales y la naturaleza de las exposiciones a agentes nocivos, considerando la progresión de la enfermedad y la necesidad de detección temprana. La espirometría se recomienda de forma anual en mineros y trabajadores de la construcción, ya que permite identificar alteraciones obstructivas o restrictivas inducidas por exposiciones a polvo de sílice y partículas en suspensión. Dado que enfermedades como la silicosis y la neumoconiosis se desarrollan progresivamente, una evaluación anual es suficiente para detectar cambios en los parámetros funcionales respiratorios y tomar medidas preventivas oportunas.

Las pruebas respiratorias no solo cumplen un papel en la vigilancia médica ocupacional, sino que también son determinantes en el proceso de selección y cualificación laboral. En este sentido, la compatibilidad

de un trabajador con determinadas condiciones industriales y atmosféricas se evalúa con el fin de garantizar que la exposición laboral no genere un deterioro en su función respiratoria (61,28).

El uso de pruebas funcionales como la espirometría y el análisis de gases arteriales es especialmente relevante en minería y procesos químicos, donde la inhalación prolongada de partículas tóxicas puede comprometer la capacidad pulmonar y aumentar el riesgo de enfermedades respiratorias crónicas (62). Para garantizar un monitoreo adecuado de la salud respiratoria de los trabajadores expuestos a factores de riesgo, es fundamental la aplicación de evaluaciones médicas periódicas, las cuales deben realizarse en diferentes etapas de la vida laboral. Estas incluyen exámenes médicos previos a la contratación, con el propósito de establecer una línea base del estado pulmonar del trabajador antes de su exposición a agentes nocivos. Posteriormente, se debe realizar un monitoreo en intervalos de seguimiento, ajustado según el nivel de riesgo de cada sector, para detectar tempranamente alteraciones en la función pulmonar. Finalmente, las evaluaciones post-ocupacionales permiten determinar el impacto acumulativo de la exposición laboral en la salud respiratoria del trabajador y, en caso necesario, implementar medidas de compensación y tratamiento (63).

La medición de la capacidad de difusión de monóxido de carbono (DLCO) debe realizarse cada 6 meses en trabajadores expuestos a vapores tóxicos, como óxidos de nitrógeno, cloro y disocianatos, debido

a que estos agentes pueden provocar inflamación y fibrosis pulmonar intersticial temprana (68).

La detección semestral es clave para identificar alteraciones en el intercambio gaseoso antes de que se reflejen en la espirometría. Por su parte, la tomografía axial computarizada de alta resolución (TACAR) se recomienda cada 3 meses en trabajadores con antecedentes de exposición al amianto, ya que esta técnica es el estándar para la detección de placas pleurales, fibrosis intersticial y asbestosis. Dado que la asbestosis es una enfermedad de latencia prolongada con un curso progresivo e insidioso, la vigilancia trimestral en individuos con exposición significativa permite detectar cambios fibróticos en estadios iniciales, posibilitando intervenciones tempranas. En conclusión, los intervalos de evaluación de estas pruebas están fundamentados en la progresión esperada de la enfermedad, la agresividad de la exposición y la capacidad de cada prueba para detectar alteraciones tempranas en la función pulmonar, permitiendo un monitoreo adecuado para la prevención y manejo de enfermedades ocupacionales (68).

Según Lewis y Fishwick (63), los programas de vigilancia médica han demostrado mayor eficacia cuando incluyen espirometrías periódicas, pruebas de provocación bronquial y tomografía computarizada de alta resolución (TACAR), especialmente en la identificación de patrones indicativos de enfermedades pulmonares intersticiales o obstructivas de origen laboral. Estas pruebas permiten detectar de manera temprana cambios en la función pulmonar y adaptar las condiciones laborales

para prevenir el deterioro progresivo de la salud respiratoria de los trabajadores.

Otro aspecto clave de su vigilancia médica ocupacional es el registro y notificación de enfermedades ocupacionales. La implementación de sistemas eficientes de notificación es crucial para la creación de las bases de datos tanto nacionales e internacionales sobre la prevalencia de enfermedades respiratorias laborales. Un sistema de notificación adecuado no solo permite conocer la magnitud real del problema, sino que también facilita su implementación de estrategias de control basadas en evidencia epidemiológica. De acuerdo con Markowitz y la OIT (64), un sistema eficiente de registro de enfermedades debe incluir un mecanismo de retroalimentación de información entre autoridades sanitarias, empleadores y trabajadores, lo que garantiza una respuesta oportuna ante el aumento de casos y permite la adopción de medidas correctivas en los ambientes laborales.

No obstante, el éxito de los programas de vigilancia médica depende en gran medida de la capacitación y educación de los trabajadores y empleadores. La organización mundial de la salud (OMS) ha resaltado la importancia de la formación en salud ocupacional como una estrategia clave para reducir la exposición a agentes nocivos en ambiente laboral. La capacitación adecuada no solo mejora el cumplimiento de las normativas de seguridad, sino que también contribuye a concientizar a los trabajadores sobre los riesgos asociados a su actividad y la importancia de las medidas de protección personal.

De hecho, programas educativos dirigidos a la prevención del contacto con polvo y contaminantes industriales han demostrado ser eficaces para reducir en un 27% el ausentismo laboral asociado a enfermedades respiratorias (65).

Estos elementos—evaluaciones médicas periódicas, registro eficiente de enfermedades y capacitación continua—constituyen los pilares fundamentales de la vigilancia de la salud ocupacional. Su correcta implementación no solo permite la detección temprana y control de enfermedades respiratorias, sino que también contribuye a mejorar las condiciones laborales y reducir la carga de enfermedades pulmonares en trabajadores expuestos a contaminantes en distintos sectores industriales.

I.3.3. Uso con fines diagnósticos en Medicina Ocupacional

En las pruebas en función respiratoria desempeñan algo relevante en la medicina ocupacional, ya que permiten en la detección temprana de y en el seguimiento y evaluación de la evolución de enfermedades respiratorias ocupacionales. Estas pruebas contribuyen a la identificación de afecciones pulmonares antes de que se manifiesten clínicamente, lo que facilita la implementación de medidas preventivas y la optimización de estrategias terapéuticas (28,14).

Detección temprana de enfermedades ocupacionales

El uso de pruebas respiratorias en la vigilancia ocupacional permite detectar anomalías en la función pulmonar antes de que los trabajadores presenten síntomas evidentes. Esta evaluación temprana

resulta crucial en entornos laborales con exposición a minerales, polvos industriales, humos y vapores tóxicos, ya que muchas enfermedades ocupacionales, como la neumoconiosis, la EPOC y el asma ocupacional, pueden presentar una progresión lenta y silente en sus etapas iniciales (61,28). La espirometría es el método de primera línea para la detección de patrones obstructivos y restrictivos en trabajadores expuestos a estos agentes, proporcionando información clave sobre la disminución de la capacidad pulmonar y la presencia de inflamación o fibrosis en los pulmones (62,66,67,27).

Seguimiento y monitoreo de enfermedades ocupacionales

El monitoreo regular de la función pulmonar es fundamental en los trabajadores con riesgo de deterioro respiratorio. La comparación de resultados de pruebas espirométricas en distintos momentos permite evaluar la progresión de enfermedades obstructivas y restrictivas, lo que posibilita la toma de decisiones sobre ajustes en el ambiente laboral o la implementación de medidas de protección adicional. Esto es especialmente importante en trabajadores con exposición continua a partículas inhalables y gases tóxicos, quienes presentan un mayor riesgo de desarrollar fibrosis pulmonar o invalidez respiratoria si no se toman medidas correctivas a tiempo (59,60).

Evaluación de aptitud laboral

En el contexto de la medicina ocupacional, las pruebas de función respiratoria son herramientas esenciales para determinar la compatibilidad de un trabajador con su ambiente laboral. Durante la

evaluación de aptitud laboral, se considera el impacto de la exposición a agentes respiratorios sobre la salud pulmonar del individuo, asegurando que pueda desempeñar sus funciones sin riesgo de desarrollar enfermedades ocupacionales. En sectores como la minería y los procesos químicos, se requieren pruebas especializadas, como la espirometría y la evaluación de gases arteriales, para determinar la capacidad pulmonar y la oxigenación en condiciones de exposición a sustancias tóxicas (61,28,62).

Tabla 5. *Evaluación de aptitud laboral*

Evaluación de Aptitud	Pruebas Aplicadas	Industria
Evaluación inicial	Espirometría	Manufactura de productos químicos
Control periódico	Espirometría y DLCO	Trabajadores de industrias metalúrgicas
Pruebas finales	Evaluación de gases arteriales	Trabajadores jubilados con riesgo de fibrosis

Fuente: Elaboración propia

Según la función respiratoria y basadas en la consultas realizadas a autoridades reguladoras y autores, las pruebas de función pulmonar pueden clasificarse en diferentes categorías de acuerdo a su aplicabilidad en el diagnóstico, monitoreo y prevención de enfermedad respiratoria relacionada a la exposición en el empleo.

Prevención y estrategias de control

La implementación de pruebas de función respiratoria en los programas de salud ocupacional permite identificar riesgos antes de que se desarrollen enfermedades crónicas, facilitando intervenciones oportunas para reducir la exposición y mejorar las condiciones laborales. Acciones

preventivas como el uso de equipos de protección respiratoria (EPR), la reducción de la exposición a contaminantes y la optimización de la ventilación en los espacios laborales han demostrado ser eficaces para minimizar la aparición de enfermedades pulmonares ocupacionales (62,66,67,27).

La selección adecuada de la prueba diagnóstica depende de la patología sospechada y del tipo de exposición del trabajador. Por ello, se ha establecido un esquema de pruebas recomendadas según la condición clínica del trabajador:

Tabla 6. *Pruebas recomendadas según la posible patología*

Posible condición clínica	Prueba Recomendada
Asma ocupacional	Prueba de provocación bronquial con metacolina
Neumoconiosis	Radiografía de tórax y TACAR
EPOC inducido por exposición laboral	DLCO
Hipoxemia crónica	Oximetría y Evaluación de gases arteriales

Fuente: Elaboración propia

Clasificación de las pruebas de función pulmonar en el ámbito ocupacional

Las pruebas de función respiratoria en medicina ocupacional pueden clasificarse según su aplicación en el diagnóstico, monitoreo y prevención de enfermedades relacionadas con la exposición en el trabajo.

Tabla 7. *Clasificación de las pruebas de función pulmonar en el ámbito ocupacional*

Prueba	Descripción
Espirometría	Evaluación de volúmenes y flujos pulmonares para diagnosticar enfermedades obstructivas (asma ocupacional, EPOC) y restrictivas (fibrosis pulmonar, neumoconiosis) (28,61).
Difusión Pulmonar de Monóxido de Carbono (DLCO)	Determina la capacidad de transferencia de gases en los pulmones, crucial para evaluar enfermedades intersticiales y daño alveolar por exposición a polvos o agentes químicos (28,61).
Pletismografía Corporal	Cuantificación de volúmenes pulmonares estáticos y resistencias de la vía aérea para evaluar enfermedades restrictivas y obstructivas (28,62).
Oximetría de Pulso	Medición no invasiva de la saturación de oxígeno en la sangre, utilizada para evaluar la oxigenación en trabajadores con enfermedades respiratorias crónicas (62).
Pruebas de Fracción Exhalada de Óxido Nítrico (FeNO)	Indicador de inflamación en las vías respiratorias, utilizada para el diagnóstico del asma ocupacional (62).

Fuente: Elaboración propia

El uso de pruebas respiratorias con fines diagnósticos en medicina ocupacional es una herramienta clave para la detección, monitoreo y prevención de enfermedades respiratorias ocupacionales. Su correcta aplicación permite identificar riesgos laborales, adaptar condiciones de trabajo y garantizar la seguridad y salud de los trabajadores expuestos a agentes nocivos (28,61). La integración de estas pruebas dentro de los protocolos de vigilancia médica ocupacional facilita la toma de decisiones informadas para reducir la incidencia de enfermedades pulmonares en entornos laborales y mejorar la calidad de vida de los trabajadores (66,68).

Evolución de las pruebas de función pulmonar en los últimos años

En la última década, las pruebas de función pulmonar han evolucionado significativamente en términos de precisión diagnóstica, estandarización y uso de tecnología avanzada. Desde 2013, la Iniciativa Global de Función Pulmonar (GLI) desarrolló ecuaciones de referencia más precisas para la espirometría, mejorando la interpretación de los valores en distintos grupos poblacionales. En los años siguientes, se reforzaron los criterios para evaluar la respuesta a broncodilatadores y se destacó la importancia de la medición de volúmenes pulmonares en la identificación de patrones mixtos de obstrucción y restricción. Para 2015, estudios comenzaron a demostrar que los cambios en la función pulmonar podían usarse como marcadores pronósticos en enfermedades intersticiales pulmonares, mientras que la espirometría de oscilación forzada comenzó a consolidarse como una técnica complementaria en la

evaluación de la obstrucción en enfermedades respiratorias crónicas (29).

Entre 2016 y 2018, la inteligencia artificial comenzó a integrarse en la interpretación de pruebas de función pulmonar, con estudios que demostraron su capacidad para superar a los neumólogos en la detección de patrones obstructivos y restrictivos. En 2017, nuevas normativas para la capacidad de difusión del monóxido de carbono (DLCO) enfatizaron la necesidad de ajustar los valores según la concentración de hemoglobina, lo que mejoró la precisión en el diagnóstico de enfermedades pulmonares vasculares e intersticiales. Durante este período, también se perfeccionó la medición del volumen alveolar y la transferencia de gases, permitiendo una mejor evaluación de la capacidad pulmonar en distintas patologías (32).

En 2019, la actualización de los estándares de espirometría de la ATS/ERS introdujo cambios en los criterios de aceptabilidad y repetibilidad, lo que redujo la variabilidad en los resultados y permitió una mayor reproducibilidad de las pruebas. Un año después, el impacto de la pandemia de COVID-19 aceleró el desarrollo de herramientas de evaluación remota de la función pulmonar, con un aumento en la implementación de oximetría de pulso y pruebas domiciliarias de espirometría. La telemedicina se convirtió en una estrategia clave para el seguimiento de enfermedades respiratorias crónicas como el asma y la EPOC (2).

En 2021, la ERS/ATS publicó nuevas estrategias interpretativas para pruebas de función pulmonar, promoviendo la integración de espirometría, pletismografía y DLCO para una evaluación más precisa de las enfermedades respiratorias. Se enfatizó el uso del índice RV/TLC en el EPOC para evaluar el atrapamiento aéreo y la hiperinsuflación pulmonar, lo que permitió un mejor enfoque diagnóstico y terapéutico en estos pacientes. En los últimos dos años, la tendencia se ha dirigido hacia la personalización del diagnóstico a través de algoritmos que combinan múltiples pruebas de función pulmonar y biomarcadores clínicos. Además, se ha refinado la relación entre la capacidad de difusión pulmonar y los volúmenes pulmonares, lo que ha permitido modelos predictivos más precisos sobre el deterioro funcional en enfermedades respiratorias (29).

La evolución de estas pruebas ha mejorado la precisión diagnóstica y la capacidad de monitoreo a lo largo del tiempo. La combinación de espirometría, medición de volúmenes pulmonares y DLCO se ha consolidado como el estándar en la evaluación de enfermedades obstructivas y restrictivas, permitiendo diagnósticos más certeros y estrategias terapéuticas más efectivas. Además, la incorporación de inteligencia artificial, la telemedicina y la integración de biomarcadores han permitido optimizar la interpretación de los resultados y mejorar el seguimiento clínico de los pacientes.

II. CONCLUSIONES

Esta investigación ha permitido abordar los principios fisiológicos y regulatorios de las evaluaciones de la función respiratoria desde la medicina laboral y su aplicación en el monitoreo médico y la supervisión de los trabajadores expuestos y el diagnóstico de enfermedades pulmonares relacionadas con el trabajo. En cuanto a la fisiología respiratoria, la revisión del tema permitió definir que el papel del sistema respiratorio en el mantenimiento del equilibrio interno del cuerpo se expresa en el control de la ventilación, el intercambio de gases y la oxigenación de los tejidos. La función pulmonar evalúa elementos como la capacidad pulmonar, la mecánica respiratoria y la eficiencia de los músculos respiratorios, que son alterados por el impacto de los contaminantes en condiciones laborales. Por lo tanto, la comprensión de estos elementos es vital para una administración adecuada y una interpretación precisa de las pruebas de función respiratoria en condiciones de medicina laboral.

Con respecto a las disposiciones regulatorias, las leyes nacionales e internacionales establecen procedimientos legales para evaluar la función pulmonar en los trabajadores en riesgo. En el caso de Perú, la ley No 29783 MINSA junto con los reglamentos establece un programa obligatorio de monitoreo que incluye la espirometría y pruebas complementarias para prevenir y diagnosticar enfermedades relacionadas con el trabajo, como neumoconiosis, asma ocupacional y EPOC.

A nivel global, regulaciones como las de la OSHA en los Estados Unidos, la Directiva, 89/391/CEE en la Unión Europea y Corea del Sur y Japón tienen

parámetros específicos que varían según la nación, pero en general, de acuerdo a la apreciación desde la medicina laboral, apoyan la necesidad de controles periódicos y acciones de control para reducir la incidencia de enfermedades relacionadas con el trabajo.

Según el estudio de las pruebas de función respiratoria, la espirometría, la pletismografía, la oximetría de pulso y la FeNO son cruciales para la detección y el seguimiento de las lesiones pulmonares. Cada procedimiento proporciona información importante de varios aspectos de la fisiología respiratoria, lo que permite reconocer los patrones obstructivos y restrictivos, así como los trastornos de la difusión alveolocapilar, proporcionando una imagen completa de la salud pulmonar del trabajador. Históricamente, las pruebas de función respiratoria también han sido un aspecto crucial de la práctica de la medicina laboral. Esta información se ha comprobado esencial para monitorear a los trabajadores que son propensos a diversos agentes inhalables. La realización frecuente de estos procedimientos permite diagnosticar los problemas de salud antes de que aparezcan los síntomas clínicos, acomodar el lugar del trabajo y prevenir los problemas. La comparación regular de los datos de las pruebas a lo largo del tiempo también permite determinar la dinámica de la exposición y puede ayudar a decidir cómo cambiar el proceso para disminuir los riesgos. En general, las pruebas de función respiratoria son herramientas fundamentales de la medicina ocupacional no solo para el diagnóstico, sino también para su prevención, seguimiento y control.

Con un sistema normativo adecuado, se podría mejorar la detección temprana de la enfermedad pulmonar, bajar el número de patologías ocupacionales y

hacer que el lugar del trabajo sea mucho más seguro para los empleados expuestos.

III. RECOMENDACIONES

Se recomienda fortalecer los programas de monitoreo respiratorio en empleados expuestos a factores de riesgo, capacitándolos para que realicen de manera periódica pruebas de función pulmonar que incluyan espirometría, DLCO, pletismografía corporal, oximetría de pulso y FeNO. La estandarización de estas evaluaciones permitirá identificar de manera temprana problemas en la función pulmonar y contribuirá a la prevención de enfermedades crónicas.

Es recomendable garantizar el cumplimiento de la Ley N.º 29783 y su normativa correspondiente, así como de los protocolos técnicos emitidos por el MINSA en Perú. Además, se recomienda la constante actualización de la normativa, incluyendo la incorporación de avances tecnológicos y enfoques internacionales en el campo, con el propósito de mejorar la evaluación de la función pulmonar en el ámbito laboral.

Se recomienda aplicar la capacitación del personal médico y técnico encargado de realizar e interpretar las pruebas de función pulmonar mediante certificaciones profesionales, asegurando que todos utilicen equipos calibrados y metodologías estandarizadas de acuerdo con las guías de la ATS y la ERS. La certificación de estos profesionales permitirá disminuir los margen de error de la prueba y aumentará la exactitud del resultado para su interpretación diagnóstica. Una digitalización de los registros de salud ocupacional para centralizar la información sobre pruebas respiratorias y mejorar el acceso al historial clínico al integrar sistemas electrónicos de monitoreo epidemiológico

conjuntamente. Esta estrategia favorecerá el control de los empleados y facilitará las decisiones en la prevención de enfermedades pulmonares.

Seguimiento intensivo en sectores con alta exposición a contaminantes inhalables, tales como la minería, manufactura, construcción, agricultura y salud. La implementación de control ambiental, ventilación y uso obligatorio de equipos de protección respiratoria contribuirán a disminuir la incidencia de enfermedades laborales. Fomento a la investigación del ámbito de las pruebas de función pulmonar para desarrollar estrategias que ayuden al apoyo de diagnóstico y tratamiento de enfermedades respiratorias ocupacionales. Establecimiento de estudios que analicen la eficacia de las normativas actuales y el impacto de la salud.

Realizar la creación de programas de educación y concientización para empleadores y empleados sobre la importancia del cuidado de la salud respiratoria, uso de medidas de protección y realización de pruebas de función pulmonar. La prevención es clave para erradicar el impacto de los problemas pulmonares laborales a nivel nacional. Brindar ecuaciones de referencia adaptadas al peruana que consideren variables como la edad, sexo, altura, etnia y otros con fines de mejorar nuestra interpretación de los resultados de la prueba en el país. Auditorías y revisión regulatorias periódicas que permitan detectar deficiencias y verificar que las pruebas respiratorias sean aplicadas apropiadamente y dentro de los estándares de seguridad establecidos en el país.

IV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Organización Mundial de la Salud (OMS). Protección de la salud de los trabajadores. [Online].; 30 de noviembre de 2017. Available from: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/protecting-workers'-health>.
2. Blanc P, Annesi I, Balmes J, Cummings K, Fishwick D, Miedinger D, Redlich C. The occupational burden of nonmalignant respiratory diseases. An official American Thoracic Society and European Respiratory Society statement. *American journal of respiratory and critical care medicine*. 2019; 199(11): p. 1312-1334.
3. Condemaita E. Características epidemiológicas, clínicas y tomográficas en pacientes con Enfermedad Pulmonar Intersticial Difuso Lima: Universidad Peruana Cayetano Heredia; 2022.
4. Murgiaa N, Akgunb M, Blancc P, Costa J, Moitrae S, Munoz X, Toreng K, Ferreirah A. Issue 3—The occupational burden of respiratorydiseases, an update. *Pulmonology*. 2024; XXXX(1-16).
5. Organización Panamericana de la Salud (OPS). La carga de las enfermedades respiratorias crónicas en la Región de las Américas, 2000-2019. [Online].; 2021. Available from: <https://www.paho.org/es/enlace/carga-enfermedades-respiratorias-cronicas>.
6. Aquino C, Huamán K, Jiménez F. Enfermedades ocupacionales en minería en el Perú, 2011-2020. *Revista de la Asociación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo*. 2022; 31(3): p. 275-282.

7. Laney A, Attfield M. Coal workers' pneumoconiosis and progressive massive fibrosis are increasingly more prevalent among workers in small underground coal mines in the United States. *Occupational and environmental medicine*. 2010; 67(6): p. 428-431.
8. Macklem, P. The Physiology of Small Airways. *American Journal of Respiratory and care Medicine*. 1998; 157: p. S181-S183.
9. Bhakta N, McGowan A, Ramsey K, Borg B, Kivastik J, Knight S, Kaminsky D. European Respiratory Society/American Thoracic Society technical statement: standardisation of the measurement of lung volumes, 2023 update. *European Respiratory Journal*. 2023; 64(4): p. 2201519.
- 10 Mena E, Bolton R. Aparato respiratorio. *Mediterráneo*. 1999; 27: p. 185-189.
- 11 David S, Goldin J, Edwards C. Forced expiratory volume. In *StatPearls [Internet]*.: . StatPearls Publishing; 2024.
- 12 Presidencia del Consejo de Ministros. Línea del tiempo - Legislación de Seguridad y Salud en el Trabajo (PCM). [Online].; S.f.. Available from: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6931706/3572362-linea-de-tiempo-de-la-legislacion-de-sst-en-el-peru.pdf?v=1726164238>.
- 13 Perú. Congreso de la República del Perú. Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo. . Ley N°29782. (20 de agosto de 2011)..
- 14 Perú. Congreso de la República del Perú. Decreto Supremo que modifica diversos . artículos del Reglamento de la Ley N° 29783, Ley de Seguridad y Salud en el

- Trabajo, aprobado por Decreto Supremo N° 005-2012-TR y sus modificatorias. (29 de enero de 2021)..
- 15 United States of América Department of Labor. OSH Act of 1970. [Online].; 1 de enero de 2004. Available from: <https://www.osha.gov/laws-regs/oshact/completeoshact>.
- 16 United States of America. Department of Labor. Todo sobre OSHA. Administración de Seguridad y Salud Ocupacional. Departamento de Seguridad y Salud Ocupacional Departamento del Trabajo de los EE.UU.; 2024.
- 17 Diario Oficial de la Unión Europea. DIRECTIVA 2009/104/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. Relativa a las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores. [Online].; 16 de septiembre de 2009. Available from: <https://www.boe.es/doue/2009/260/L00005-00019.pdf>.
- 18 Derek M, Tsai F, Kim J, Tejamaya M, Putri V, Muto G, Reginald A, Reginald W, Granadillos N, Zainal M, Capule C, et al. Overview of Legal Measures for Managing Workplace COVID-19 Infection Risk in Several Asia-Pacific Countries. *Safety and Health at Work*. 2021; 12: p. 530-535.
- 19 The LAWPHiL Project. Congreso de Filipinas. Begun and held in Metro Manila, on Monday, the twenty-fourth day of July, two thousand seventeen. REPUBLIC ACT No. 11058. [Online].; 17 de agosto de 2018. Available from: https://lawphil.net/statutes/repacts/ra2018/ra_11058_2018.html.
- 20 Organización Internacional del Trabajo (OIT). Filipinas. Normas laborales. [Online].; 2024. Available from:

https://normlex.ilo.org/dyn/nrmlx_es/f?p=1000:11110:0:NO:11110:P11110_COUNTRY_ID:102970.

- 21 Pillay M, Manning W. A critical analysis of the current South African . occupational health law and hearing loss. South African Journal of Communication Disorders. 2020; 67(2): p. 1-11.
- 22 Chikwanka T, Chiluba B. Occupational health and safety for workers who are . disabled in Africa. Indonesian Journal of Disability Studies. 2020; 7(1): p. 110-115.
- 23 Presidencia de la República. Reglamento del registro de Auditores autorizados . para la evaluación periódicaa del Sistema de Gestión de la Seguridad y Slud en el Trabajo. 24 de diciembre de 2013..
- 24 Presidencia de la República del Perú. Decreto Supremo que modifica diversos . artículos del Reglamento de la Ley N° 29783, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo, aprobado por Decreto Supremo N° 005-2012-TR y sus modificatorias. (29 de enero de 2021)..
- 25 Graham, B; Steenbruggen, I; Miller, M; Barjaktarevic, I; Cooper, B; Hal, G; . Hallstrand, T; Kaminsky, D; McCarthy, K; McCormack, M; Oropez,C; Rosenfeld, M; Stanojevic, S; Swanney, M; Thompson, B; American Thoracic Society and the European Respiratory. Standardization of Spirometry 2019 Update An Official American Thoracic Society and European Respiratory Society Technical Statement. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. 2019 Octubre; 200(8).

- 26 Graham B, Steenbruggen I, Miller M, Barjaktarevic I, Cooper B, Hall G, Hallstrand T, Kaminsky D, McCarthy et al. Standardization of spirometry 2019 update. An official American thoracic society and European respiratory society technical statement. American journal of respiratory and critical care medicine. 2019; 200(8): p. e70-e88.
- 27 Ministerio de Sanidad. Protocolo de vigilancia sanitaria específica. Silicosis. Madrid: Centro de Publicaciones del Ministerio de Sanidad; 2020.
- 28 Ministerio de Salud (MINSa). Documento técnico: Protocolos de Exámenes Médico Ocupacionales y Guías de Diagnósticos de los Exámenes Médicos Obligatorios por Actividad RM N° 312-2011 MINSa. Primera ed. Ambiental DGdS, editor. Lima: Ministerio de Salud; 2011.
- 29 Vázquez J, Gochicoa L, Del Río R, Cid S, Silva M, Miguel J, Torre L, et al. Prueba de difusión pulmonar de monóxido de carbono con técnica de una sola respiración (DL, COsb). Recomendaciones y procedimiento. NCT Neumología y Cirugía de Tórax. 2016; 75(2): p. 161-172.
- 30 Sastre S. Capacidad de difusión de monóxido de carbono: principios teóricos, formas de medición y aplicaciones clínicas. Neumosur: revista de la Asociación de Neumólogos del Sur. 1990; 2(2): p. 57-75.
- 31 Guerrero S, Vázquez J, Gochicoa L, Cid S, Benítez R, del Río R, et al. Pletismografía corporal: recomendaciones y procedimiento. Neumol Cir Torax. 2016 Octubre; 75(4).
- 32 American Thoracic Society. Pruebas de la función pulmonar. Am J Respir Crit Care Med. 2015; 189.

- 33 MINSALUD. Uso e interpretación de la Oximetría de Pulso Salud OMdl, editor.
. Bogotá; 2016.
- 34 Organización Panamericana de la Salud. Aspectos técnicos y regulatorios sobre el
. uso de oxímetros de pulso. Primera ed. OMS , editor. Washington DC; 2020.
- 35 Khatri, S; Iaccarino, J; Barochia, A; Soghier, I; Akuthota, P; Brady, A; Covar, R;
. Debley, J; Fitzpatrick, A; Kaminsky, D; Kenyon, N; Khurana, S; Lipworth, B;
McCarthy, K; Peters, M; Que, L; Ross, K; Schneider, E; Sorkness, C; Hallstrand,
T; ATSAA. Use of Fractional Exhaled Nitric Oxide to Guide the Treatment of
Asthma. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. 2021
Noviembre; 204(10).
- 36 Cantú G, Fernández F, Gochicoa L, Miguel J, Vargas C, Mejía R, et al. Fracción
. exhalada de óxido nítrico. Recomendaciones clínicas y procedimiento. Neumol
Cir Torax. 2018 Enero; 72(1).
- 37 Aguilar A, Cisneros M, Del Rio B, Sienna J. Fisiopatología del asma. Revista
. Alergia Mexico. 1998; 45(4): p. 92–97.
- 38 Benavides F, Ruiz C, García A. Salud laboral. Conceptos y técnicas para la
. prevención de riesgos laborales. Revista Especializada de Salud Pública. 1997;
71(1): p. 409-410.
- 39 Gestal J. Riesgos del trabajo del personal sanitario: McGraw-Hill; 2013.
.
- 40 Mamane A, Baldi I, Tessier J, Raheison C, Bouvier G. Occupational exposure to
. pesticides and respiratory health. European Respiratory Review. 2015; 24(136): p.
306-319.

- 41 Lytras T, Beckmeyer A, Kogevina M, Kromhout H, Carsin A, Antó J, Zock J, et al.. Cumulative occupational exposures and lung-function decline in two large general-population cohorts. *Annals of the American Thoracic Society*. 2021; 18(2): p. 238-246.
- 42 Pisani A, Balduini B, Tomasina F. Work-related Asthma: a case report. *Revista Médica del Uruguay*. 2024; 40(1).
- 43 Mejía J, González L. El trabajo como un factor de riesgo en la enfermedad pulmonar obstructiva Crónica (EPOC) y otras patologías respiratorias. *Revista Colombiana de Salud Ocupacional*. 2023; 13(1): p. 1-11.
- 44 Camacuari F. Factores de riesgo laboral y enfermedades ocupacionales en el profesional de enfermería del Centro Quirúrgico Hospital Nacional Dos de Mayo. *Revista médica panacea*. 2019; 10(2): p. 89-93.
- 45 Vicente; T; Ramírez, V; Santamaría, C; Torre, I; Capdevilla, L. Cribado de la función respiratoria en trabajadores y relación con variables sociales y laborales. *Medicina Balear*. 2020 Enero; 35(1).
- 46 Jalasto J, Lassmann P, Schyllert C., Luukkonen R, Meren M, Larsson M, Piirilä P. Occupation, socioeconomic status and chronic obstructive respiratory diseases—The EpiLung study in Finland, Estonia and Sweden. *Respiratory Medicine*. 2022; 191(1): p. 106403.
- 47 Susilo J, Tunjungsari F. Resiko Gangguan Pernapasan pada Industri Besi Baja. *CoMPHI Journal: Community Medicine and Public Health of Indonesia Journal*. 2022; 3(2): p. 110-121.

- 48 Islamiyati N, Nurjazuli N, Suhartono S. Faktor-Faktor yang Berhubungan dengan . Gangguan Fungsi Paru pada Pekerja Penggilingan Padi: Kajian Sistematis. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*. 2013; 19(5): p. 311-321.
- 49 Hamzah N, Mohd S, Ismail N. Metal dust exposure and lung function deterioration . among steel workers: an exposure-response relationship. *International journal of occupational and environmental health*. ; 22(3): p. 224-232.
- 50 Subramaniam S, Raju N, Ganesan A, Rajavel N, Chenniappan M, Stonier A, . Basak A. Impact of cotton dust, endotoxin exposure, and other occupational health risk due to indoor pollutants on textile industry workers in low and middle-income countries. *Journal of Air Pollution and Health*. 2024; 9(1): p. 75-96.
- 51 Khan M, Muhmood K, Noureen S, Mahmood H, Amir-ud-, R. Epidemiology of . respiratory diseases and associated factors among female textile workers in Pakistan. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2024; 28(1): p. 184-198.
- 52 Rahmani A, Alhorabi A, Josef J, Babiker A. Study of work related respiratory . symptoms among welding workers. *Asian J Pharm Clin Res*. 2018; 11(2): p. 97-99.
- 53 Kumar De S, Maiti S, Ghosh P, Paliwal L. Pulmonary function status of refractory . workers in a steel plant: A cross-sectional study design. *Ethiopian Journal of Health Development*. 2019; 33(4).
- 54 Chika C. Occupational diseases and diseases associated with the workplace. . *International Journal of Medical Evaluation and Physical Report*. 2021; 5(1): p. 1-13.

- 55 Dalju I, Dessie A, Bogale L, Mekonnen T. Occupational risk factors associated with respiratory symptoms among tannery workers in Mojo town, Southeast Ethiopia, 2018: a comparative cross-sectional study. *Multidisciplinary Respiratory Medicine*. 2019; 14(1): p. 1-10.
- 56 Daba C, Debela SA, Atamo A, Desye B, Necho M, Tefera Y, et al. Prevalence of occupational respiratory symptoms and associated factors among industry workers in Ethiopia: A systematic review and meta-analysis. *PLoS ONE*. 2023; 18(7): p. 1-17.
- 57 Ashuro Z, Hareru H, Soboksa N, Abaya S, Zele Y. Occupational exposure to dust and respiratory symptoms among Ethiopian factory workers: A systematic review and meta-analysis. *Plos one*. 2023; 18(7): p. 1-20.
- 58 Ministerio de Salud (MINSA). Análisis de la Información de Vigilancia de la Salud de los Trabajadores del Perú 2021: MINSA; 2024.
- 59 Benítez R, Cortés A, Meneses É, Silva M, Río R, Monraz S, González M, Camargo R, Torre L. Espirometría: actualización del procedimiento y perspectivas pospandemia. *Neumología y cirugía de tórax*. 2023; 82(2): p. 104-124.
- 60 Townsend M. Spirometry in occupational health—2020. *Journal of occupational and environmental medicine*. 2020; 62(5): p. e208-e230.
- 61 Ministerio de Salud del Perú (MINSA). Guía de Evaluación Médico Ocupacional (GEMO-006). Primera ed. Salud CNdSOyPdApl, editor. Lima: MINSA; 2008.
- 62 Maree D, Swanepoel R, Swart F, Gray D, Masekela R, Allwood B, Van Zyl-Smit, Koegelenberg C. Position statement for adult and paediatric spirometry in South

- Africa: 2022 update. African Journal of Thoracic and Critical Care Medicine. 2022; 28(4): p. 181-192.
- 63 Lewis L, Fishwick D. Health surveillance for occupational respiratory disease. Occupational medicine. 2013; 63(5): p. 322-334.
- 64 Markowitz S, Organización Internacional del Trabajo. Sistemas de vigilancia y notificación de enfermedades profesionales. Organización Internacional del Trabajo. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. 2001; 4: p. 32-2. - 32.36.
- 65 Organización Mundial de Salud (OMS). Protección de la salud de los trabajadores. [Online].; 30 de noviembre de 2017. Available from: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/protecting-workers'-health>.
- 66 Wang F, Wang K, Bowerman C, Ulla H, Sun J, Topalovic M, Li Q. Evaluation of the Global Lung Function Initiative 2012 reference values for spirometry in China: a national cross-sectional study. European Respiratory Journal. 2022; 60(6): p. 1-6.
- 67 Louis R, Satia I, Ojanguren I, Schleich F, Bonini M, Tonia T, Usmani O, et al. European Respiratory Society guidelines for the diagnosis of asthma in adults. European Respiratory Journal. 2022; 60(3).
- 68 Vanjare N, Chhowala S, Madas S, Kodgule R, Gogtay J, y Salvi S. Use of spirometry among chest physicians and primary care physicians in India. NPJ primary care respiratory medicine. 2016; 26(1): p. 1-5.
- 69 Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. Protocolos de vigilancia sanitaria específica. Amianto Madrid: Centro de Publicaciones del Ministerio de Sanidad; 2013.

70 Aggarwal A, Agarwal R, Dhooria S, Prasad K, Sehgal I, Muthu V, Kodati R. Joint
. Indian chest society-national college of chest physicians (India) guidelines for
spirometry. Lung India. 2019; 36(1): p. S1-S35.