

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL
INSTITUTO INTEGRADO DE SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO MOVIMENTO

**RELAÇÃO ENTRE EFICIÊNCIA VENTILATÓRIA E RESPOSTAS
CARDIOMETABÓLICAS DO EXERCÍCIO EM ATLETAS**

JULIANA PERONI ABRAHÃO BARBOSA

CAMPO GRANDE MS

2023

JULIANA PERONI ABRAHÃO BARBOSA

**RELAÇÃO ENTRE EFICIÊNCIA VENTILATÓRIA E RESPOSTAS
CARDIOMETABÓLICAS DO EXERCÍCIO EM ATLETAS**

Dissertação apresentada como requisito para defesa de Título de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento (PPGCMov), do Instituto Integrado de Saúde (INISA), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Linha de pesquisa: Aspectos profiláticos e terapêuticos da atividade física em diferentes condições de saúde

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Tarso Guerrero Muller

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Alexandre Boullosa

CAMPO GRANDE MS

2023

JULIANA PERONI ABRAHÃO BARBOSA

**RELAÇÃO ENTRE EFICIÊNCIA VENTILATÓRIA E RESPOSTAS
CARDIOMETABÓLICAS DO EXERCÍCIO EM ATLETAS**

Dissertação apresentada como requisito para defesa de Título de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento (PPGCMov), do Instituto Integrado de Saúde (INISA), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Linha de pesquisa: Aspectos profiláticos e terapêuticos da atividade física em diferentes condições de saúde.

Campo Grande/MS, 12 de abril de 2023

Banca examinadora:

Nota/Conceito

Prof. Dr. Paulo de Tarso Guerrero Muller (Presidente)
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

Prof^ª. Dra. Gisele Walter da Silva Barbosa (Titular)
Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul

Prof^ª. Dra. Christianne de Faria Coelho Ravagnani (Titular)
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

Prof. Dr. Hugo Alexandre de Paula Santana (Suplente)
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS

Avaliação Final: Aprovada ()

Reprovada ()

DEDICATÓRIA E AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho à minha amada família, Gualter, Maria Eduarda, Rafael, Fernando, e aos meus pais, Maria de Lourdes e Tufy, exemplos para sempre.

Agradeço primeiramente a Deus, que me proporciona a vida, sabedoria, discernimento e entendimento, por ação do Espírito Santo, para auxiliar a comunidade e ao próximo através do meu trabalho, com humildade, amor e persistência, pelo próprio testemunho de Jesus Cristo. Também à intercessão de Nossa Senhora, sempre presente em nossas vidas, modelo a ser seguido.

Agradeço a minha família, pelo apoio, compreensão, por terem aceito se privar de minha companhia, dedicada aos estudos, e cuidado em todos os momentos de dificuldades, cansaço e angústias. São minha sustentação!

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo, pelos ensinamentos, paciência e disponibilidade durante minha permanência como orientanda; reforço minha admiração pela docência que é digna e essencial!

Agradeço aos pesquisadores que me ajudaram para que esse trabalho fosse factível: Prof. Dr. Daniel Alexandre Boullosa, Prof^a. Dra Christianne de Faria Coelho Ravagnani, pesquisadora Wandriane de Vargas.

Agradeço aos voluntários participantes da pesquisa que contribuíram para este trabalho em benefício da Ciência.

RESUMO

BARBOSA, JPA. RELAÇÃO ENTRE EFICIÊNCIA VENTILATÓRIA E RESPOSTAS CARDIOMETABÓLICAS DO EXERCÍCIO EM ATLETAS. Campo Grande – MS, 2023. [Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul]

A eficiência ventilatória é determinada pelo nível de ventilação-minuto, relacionado à eliminação pulmonar de dióxido de carbono ($V'E/V'CO_2$) durante um teste de exercício cardiopulmonar (TECP). Seu papel e sua importância no desempenho esportivo não estão bem elucidados, tanto pelos níveis elevados de $V'E/V'CO_2$, encontrados em atletas, compatíveis com ineficiência ventilatória mesmo na ausência de doença cardiopulmonar, quanto pela evidência da inexistência de relação entre o consumo máximo de oxigênio ($V'O_2$) e $V'E/V'CO_2$. Foi descrito um novo método de eficiência ventilatória que leva em consideração a taxa de remoção de CO_2 para cada aumento de 10 vezes na ventilação-minuto, corrigida para a máxima taxa teórica de remoção do CO_2 ao nível da ventilação voluntária máxima predita. Supomos que o método revelaria associação entre eficiência ventilatória e parâmetros cardiometabólicos do TECP, em correspondência com a aptidão aeróbica em atletas. Objetivo: analisar a relação entre eficiência ventilatória e respostas cardiometabólicas do exercício, $V'O_2$ max e Pulso de O_2 (PuO_2), em atletas, através dos novos métodos de eficiência ventilatória, CO_2 -ACR e $\eta V'E$ e também dos convencionais $V'E/V'CO_2$ slope e $V'E/V'CO_2$ nadir, além de explorar a relação entre os índices de eficiência ventilatória e o desempenho dos atletas. Método: estudo observacional, transversal e retrospectivo sobre bases de dados de dois estudos, MEDALHA e BRASÍLIA, em que seus participantes (61) foram submetidos a TECP incremental e coletadas as variáveis de eficiência ventilatória, PuO_2 e $V'O_2$ máximo, para análise de correlação (coeficiente de correlação de Pearson/Spearman). Além disso, os indivíduos foram divididos em estratos de acordo com valores de $V'O_2$ e PuO_2 , sendo o ponto de corte em 57.8 ml/min/Kg e 11.5 ml/bpm/m² respectivamente, para posterior comparação dos dados de eficiência ventilatória (Teste t Student). Para estender o conhecimento da associação de eficiência ventilatória e desempenho, nós analisamos o tempo de corrida de 10Km em 25 corredores. Resultados: o índice de eficiência ventilatória CO_2 -ACR apresentou diferença significativa em seus valores de acordo com os grupos de $V'O_2$ ($6,7 \pm 1,8$; $7,9 \pm 2,5$, $p = 0,024$) e também no que se refere aos grupos de PuO_2 ($6,8 \pm 1,9$; $8,0 \pm 2,4$, $p = 0,004$). O CO_2 -ACR foi maior em indivíduos mais jovens e com menor IMC, essa população teve maior $V'O_2$, como esperado, mas também maior eficiência ventilatória. O CO_2 -ACR também apresentou correlação positiva com $V'O_2$ ($r = 0,325$; $p=0,010$) e PuO_2 ($\rho = 0,411$, $p = 0,001$). Concluímos que as novas métricas de eficiência ventilatória mostraram, no geral, maior associação com as variáveis cardiometabólicas do TECP em atletas. Houve moderada e negativa correlação entre o desempenho dos atletas na prova de corrida de 10Km e o índice de eficiência ventilatória *Slope* 1.

Palavras-chave: Teste de Exercício Cardiopulmonar; $V'O_2$ máximo; Pulso de O_2 ; Desempenho.

ABSTRACT

BARBOSA, JPA. ASSOCIATION BETWEEN VENTILATORY EFFICIENCY AND CARDIOMETABOLIC RESPONSES TO EXERCISE IN ATHLETES. Campo Grande – MS, 2023. [Masters Dissertation – Federal University of Mato Grosso do Sul]

Ventilatory efficiency can be defined by the minute ventilation level related to the carbon dioxide pulmonary elimination ($V'E/V'CO_2$) during a cardiopulmonary exercise test (CPET). Its role and importance in sports performance remain unclear, both because of high $V'E/V'CO_2$ levels found in athletes, compatible with ventilatory inefficiency even in the absence of cardiopulmonary disease, and because of the evidence of the lack of relationship between $V'E/V'CO_2$ and maximal oxygen uptake ($V'O_2$ max). A new efficiency ventilatory method was reported, which takes into account the CO_2 removal rate for each 10-fold increase in minute ventilation, corrected for the maximum theoretical CO_2 removal rate at the maximum voluntary ventilation predicted level. Thus, we assume that the method would reveal association between ventilatory efficiency and CPET cardiometabolic parameters, in correspondence with aerobic fitness. Objective: to analyze the relationship between ventilatory efficiency and cardiometabolic responses to exercise, $V'O_2$ max and O_2 Pulse (Pu O_2), in athletes, through the ventilatory efficiency new methods, CO_2 -ACR and $\eta V'E$ and also the conventional $V'E/V'CO_2$ slope and $V'E/V'CO_2$ nadir, in addition to exploring the association between ventilatory efficiency indices and athletes' performance. Methods: observational, cross-sectional and retrospective study, on databases, secondary to two studies, MEDALHA and BRASÍLIA, in which its participants (61 subjects) performed to a maximal incremental CPET, and the variables of ventilatory efficiency, Pu O_2 and $V'O_2$ max, were collected for correlation analysis (Pearson/Spearman). In addition, individuals were divided into groups according to $V'O_2$ and Pu O_2 values, with the cut-off point being 57.8 ml/min/Kg and 11.5 ml/beat/m², respectively, for later comparison data ventilatory efficiency (Student t Test). To extend the knowledge of the ventilatory efficiency and performance association, we analyzed the 10Km running time in 25 runners. Results: CO_2 -ACR ventilatory efficiency index values showed a significant difference according to the $V'O_2$ groups (6.7 ± 1.8 ; 7.9 ± 2.5 , $p = 0.024$) and also with regard of Pu O_2 groups (6.8 ± 1.9 ; 8.0 ± 2.4 , $p = 0.004$). CO_2 -ACR was higher in younger subjects with lower Body Mass Index (BMI), this population had higher $V'O_2$, as expected, but also higher ventilatory efficiency. CO_2 -ACR also showed a positive correlation with $V'O_2$ ($r = 0.325$; $p=0.010$) and Pu O_2 ($\rho = 0.411$, $p = 0.001$). Thus, we concluded that the the new metric for ventilatory efficiency showed, in general, a greater association with CPET cardiometabolic variables in athletes. There was a moderate and negative correlation between athletes performance in the 10 Km running and Slope 1 ventilatory efficiency index.

Keywords: Cardiopulmonary Exercise Test; Maximum $V'O_2$; O_2 Pulse; Performance.

LISTA DE SIGLAS

ATPS - Temperatura e Pressão Ambientais Saturada com Vapor D'Água

ASC - Área de Superfície Corpórea

BTPS - Condições de Temperatura Corporal e Pressão Saturada com Vapor D'Água.

CO₂ - Dióxido de Carbono

CO₂-ACR - Taxa Real Constante de Remoção de CO₂

CO₂-MCR - Dióxido de Carbono Calculado a Partir da VVM Predita

DPOC - Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica

ECG - Eletrocardiograma

EM - Espaço Morto

FC - Frequência Cardíaca

FR - Frequência Respiratória

HAS - Hipertensão Arterial Sistêmica

IMC - Índice de Massa Corpórea

LAFIR - Laboratório de Fisiopatologia Respiratória

η VE - Novo Índice de Eficiência Ventilatória

PA - Pressão Arterial

PACO₂ - Pressão Alveolar de Dióxido de Carbono

PaCO₂ - Pressão arterial de Dióxido de Carbono

PCR - Ponto de Compensação Respiratório

PuO₂ - Pulso de Oxigênio

STPD - Temperatura e Pressão- Padrão, Seco.

TCLE - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

TECP - Teste de Exercício Cardiopulmonar

V_E - Volume Minuto Expirado

V'_A - Ventilação Alveolar

$V'CO_2$ - Liberação de Dióxido de Carbono

$V'D$ - Ventilação Total do Espaço Morto

$V'O_2$ - Consumo de Oxigênio

V_C - Volume Corrente

V_D - Volume de Espaço Morto

VEM - Volume de Espaço Morto

V_S - Volume Sistólico

V_T - Volume Corrente

VVM - Ventilação Voluntária Máxima

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Dados Demográficos e Variáveis do Teste Máximo Incremental.....33

TABELA 2 - Comparação Entre Valores de Eficiência Ventilatória e Níveis de $V'O_2$ (< 57.8 ml/min/Kg e ≥ 57.8 ml/min/Kg) e PuO_2 (< 11.5 ml/bpm e ≥ 11.5 ml/bpm/m²) em Atletas.....34

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Gráfico de Dispersão Exemplificando o Ponto Mais Baixo (nadir) da Relação de $V'E/V'CO_2$ por Tempo.....	29
FIGURA 2 - Gráfico de Dispersão com Linha de Tendência e Exemplo de Equação de Regressão Linear Para Determinação <i>slope</i> da Relação $V'E/V'CO_2$	30
FIGURA 3 - Representação Gráfica para Exemplificar o Cálculo para Eficiência Ventilatória $\eta V'E$	31
FIGURA 4 - Representação Gráfica do Índice de Taxas Reais de Remoção de CO_2 (CO_2 -ACR)	35
FIGURA 5 - Demonstração Gráfica das Correlações entre $V'O_2$ (mL/min/Kg) e CO_2 -ACR, $V'E/V'CO_2$ <i>slope</i> total, $V'E/V'CO_2$ <i>slope</i> 1, $V'E/V'CO_2$ nadir e $\eta V'E$	36
FIGURA 6 - Demonstração Gráfica das Correlações entre PuO_2 /ASC e CO_2 -ACR, $V'E/V'CO_2$ <i>slope</i> total, $V'E/V'CO_2$ <i>slope</i> 1, $V'E/V'CO_2$ nadir e $\eta V'E$	37
FIGURA 7 - Demonstração Gráfica das Correlações entre $V'E/V'CO_2$ <i>slope</i> 1 e Tempo de Corrida.....	38

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	13
2.REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1 Determinantes Fisiológicos da Eficiência Ventilatória.....	15
2.1.1 Comando Central e Resposta Ventilatória.....	16
2.1.2 Integridade Quimiossensorial e Resposta Ventilatória.....	17
2.1.3 Integridade Neuromuscular na Resposta Ventilatória.....	18
2.1.4 Interação Cardiovascular.....	20
2.2 Eficiência Ventilatória na População Clínica.....	21
2.3 Eficiência Ventilatória em Atletas.....	24
3. HIPÓTESE.....	25
4. OBJETIVOS.....	25
4.1 Objetivo Principal.....	25
4.2 Objetivos Secundários.....	25
5. METODOLOGIA.....	26
5.1 Desenho do Estudo e Indivíduos.....	26
5.2 Critérios de Inclusão e Exclusão.....	26
5.3 População Estudada.....	26
5.3.1 População: Estudo- MEDALHA.....	26
5.3.2 População: Estudo -BRASÍLIA.....	27
5.4 Teste de Exercício Cardiopulmonar (TECP).....	27
5.4.1 Protocolo TECP: Estudo- MEDALHA- Laboratório Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.....	27
5.4.2 Protocolo TECP: Estudo BRASÍLIA - Laboratório Universidade Católica de Brasília.....	28
5.5 Prova de Corrida de 10Km.....	28
5.6 Parâmetros Cardiometabólicos.....	29
5.7 Estratificação dos Grupos Segundo Valores de $V'O_2$ e PuO_2	29
5.8 Determinação da Eficiência Ventilatória (Método Usual)	29
5.8.1 $V'E/V'CO_2$ nadir.....	29
5.8.2 $V'E/V'CO_2$ slope total.....	30

5.8.3 $V'E/V'CO_2$ slope 1.....	30
5.9 Determinação da Eficiência Ventilatória (Novo Método)	30
5.9.1 CO_2 -ACR (Taxa Real Constante de Remoção de CO_2)	30
5.9.2 $\eta V'_E$ (Eficiência Ventilatória, %)	31
5.10 Análise dos Dados e Estatística.....	32
6.RESULTADOS.....	33
7.DISSCUSSÃO.....	38
8.CONCLUSÃO	41
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

A eficiência ventilatória é determinada pelo nível de ventilação-minuto relacionada à eliminação pulmonar de CO_2 ($V'E/V'CO_2$) durante o teste de exercício cardiopulmonar (TECP) (SUN et al., 2002; ARENA et al., 2007). Várias maneiras de mensurar a eficiência ventilatória foram descritas, no entanto, a relação $V'E$ e $V'CO_2$ ($V'E/V'CO_2$ slope) tem sido mais comumente utilizada para essa finalidade, sendo estabelecida plotando $V'E$ (eixo y) e $V'CO_2$ (eixo x), e análise da inclinação (slope) por meio de regressão linear (PHILLIPS; COLLINS; STICKLAND, 2020), podendo ser explorada durante o tempo total de exercício, do início ao nível do limiar anaeróbio ou limiar ventilatório 1, (definido como a perda de linearidade entre $V'CO_2$ e $V'O_2$ e o mínimo valor da pressão expirada de O_2), ou mesmo abaixo do ponto de compensação respiratório (PCR) ou limiar ventilatório 2 (estabelecido como a perda de linearidade entre $V'E$ e $V'CO_2$ e o valor mais alto da pressão expirada de CO_2 antes do seu decréscimo) (NEDER; NERY, 2002).

Também o ponto nadir da relação $V'E/V'CO_2$, durante o tempo do TECP, é comumente utilizado para analisar a eficiência ventilatória. A $V'E/V'CO_2$ é elevada durante exercícios leves no início do TECP e diminui, progressiva e simultaneamente, com VD/VT (volume de espaço morto/volume-corrente) ao seu valor mais baixo (nadir), antes do ponto de compensação respiratória. É considerado um índice sensível para o acesso da eficiência ventilatória, já que ocorre independentemente: 1º- da resposta excessiva de $V'E/V'CO_2$ a baixas intensidades de exercício; e 2º- da compensação respiratória por acidose metabólica durante exercícios mais pesados (WHIPP; WARD, 1982). Em indivíduos saudáveis, os índices $V'E/V'CO_2$ nadir e $V'E/V'CO_2$ correspondentes ao limiar anaeróbio, são frequentemente similares (SUN et al., 2002).

Ao nível submáximo, a inclinação da relação ventilação- minuto e dióxido de carbono ($V'E/V'CO_2$ slope) tem apresentado resultados inconsistentes em atletas, excesso de ventilação, com valores acima dos normais, levantando dúvidas crescentes sobre o estado de saúde do atleta em particular, ou aceitação de diferentes valores como usuais para essa população (faixa de normalidade). Valores normativos de eficiência ventilatória têm sido descritos para a população em geral, porém permanecem limitados em atletas (PETEK, 2022).

A ventilação- minuto ($V'E$) é limitada por certas condições, como a resistência das vias aéreas, ao nível do exercício máximo (CAILLAUD et al., 1993; COLLINS et al., 2021). Essas

restrições ventilatórias mecânicas podem cursar com hiperinsuflação dinâmica e incremento de forças elásticas, complacência pulmonar reduzida e consequente fadiga dos músculos respiratórios por aumento do custo energético, além de trabalharem em situação de desvantagem mecânica (redução de comprimento das fibras musculares) (JOHNSON; SAUPE; DEMPSEY, 1992; GUENETTE et al., 2007; COLLINS et al., 2021). O uso de gás hélio aumentou a ventilação durante o exercício em atletas (BUONO; MALY, 1996).

Contudo, em virtude da alta aptidão física, atletas podem sustentar um esforço bem além do limiar ventilatório 2, após o aumento de $V'E$ em relação a $V'CO_2$ na fase final do exercício. A elevação dos resultados de $V'E/V'CO_2$, durante o tempo total de exercício ($V'E/V'CO_2$ total), pode induzir à fator de confusão a respeito da saúde do indivíduo. Diretrizes clínicas atuais propõem valores normais de $V'E/V'CO_2$ total < 30 ; valores mais altos indicariam ineficiência ventilatória (PETEK, 2022).

A correspondência da ventilação/perfusão nos pulmões é a principal determinante da eficiência ventilatória. Condições em que a produção de CO_2 é elevada, como no esforço físico, estabelecem um papel essencial no controle ventilatório. Assim, poderia ser possível que uma maior eficiência de eliminação de CO_2 durante o exercício permitisse uma melhor performance, porém, é digno de nota que estudos não encontraram relação significativa entre condicionamento aeróbico e $V'E/V'CO_2$ (BROWN et al., 2013; SALAZAR-MARTÍNEZ et al., 2016, 2018).

Por outro lado, foi descrito um novo método de eficiência ventilatória que leva em consideração a taxa de remoção de CO_2 para cada aumento de dez vezes na ventilação-minuto, $V'CO_2\text{-log}_{10}V'E$, corrigida para a máxima taxa teórica de remoção do CO_2 ao nível da ventilação voluntária máxima (VVM) predita (MULLER; SARAIVA, 2021). Semelhante ao *Oxygen Uptake Efficiency Slope* (OUES), essa relação descreve a taxa de remoção de CO_2 , durante o exercício gradual, para cada aumento de dez vezes em $V'E$. Sendo assim, e tendo em vista as limitações do método usual de eficiência ventilatória, propomos entender melhor a associação da nova métrica, $CO_2\text{-ACR}$ e $\eta V'E$, com as respostas cardiometabólicas oriundas do TECP. Nossa hipótese é a de existir uma associação mais forte entre as respostas cardiometabólicas do TECP, consumo máximo de O_2 ($V'O_2$ max) e Pulso de O_2 ($V'O_2/FC/ASC$), com o novo método para a análise da eficiência ventilatória, comparado às variáveis convencionais. O ponto forte dessa variável é a sua aplicabilidade, mesmo em indivíduos com trocas gasosas comprometidas e restrições ventilatórias (MULLER;

SARAIVA, 2021). Além disso, há dados escassos na literatura sobre a relação entre eficiência ventilatória e desempenho em atletas, predizendo independência para capacidade aeróbica; assim, para ampliar esse conhecimento, testamos tal associação através da análise do tempo de corrida para execução da prova de 10Km.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Determinantes Fisiológicos da Eficiência Ventilatória

A principal função do sistema respiratório é a de manter a homeostase das tensões gasosas arteriais sanguíneas e isto ocorre principalmente pela liberação de dióxido de carbono ($V'CO_2$) e captação de oxigênio ($V'O_2$) pelos pulmões, especialmente porque pequenas variações da $PaCO_2$ (pressão arterial de dióxido de carbono) podem ter dramáticas consequências no pH sistêmico - inclusive no pH do líquido cefalorraquidiano - com repercussões em toda atividade enzimática corporal (NEDER; NERY, 2002).

Segundo Collins (2020), a ventilação alveolar ($V'A$) é definida como a ventilação que participa das trocas gasosas. A relação entre $V'A$, $V'CO_2$ e a pressão parcial alveolar de CO_2 ($PACO_2$) pode ser descrita pela seguinte equação:

$$P_{ACO_2} = (V'_{CO_2}/V'_A) \times K$$

Ambos- $V'A$ e $PACO_2$ - são relatados sob BTPS (condições temperatura corporal e pressão saturada com vapor d'água). $V'CO_2$ é relatado a 0°C, 760 mmHg, sob STPD (condições de temperatura e pressão padrão, seco). K é um fator de conversão (normalmente = 863 ao nível do mar e a uma temperatura corporal normal de 37°C) usado para converter $V'CO_2$, de STPD para BTPS (KELLOGG,1987).

Para Collins et al (2021), devido às limitações técnicas, a PCO_2 arterial ($PaCO_2$) é frequentemente usada como substituto da $PACO_2$. É importante ressaltar que todo o CO_2 no gás expirado se origina de $V'A$ e, assumindo troca gasosa completa (ou seja, incompatibilidade ventilação-perfusão insignificante, limitação de difusão e/ou shunt), a PCO_2 alveolar e arterial são iguais ($PACO_2 \approx PaCO_2$). Enquanto a ventilação alveolar é geralmente bem adaptada à perfusão em indivíduos saudáveis com função pulmonar normal, uma parte do gás permanece nas vias aéreas condutoras e não participa das trocas gasosas, sendo denominado espaço morto anatômico. Além disso, os alvéolos ventilados, mas não perfundidos, representam o espaço morto alveolar. A soma do espaço morto alveolar e anatômico compõe a ventilação total do

espaço morto ($V'D$), enquanto o volume minuto expirado ($V'E$) é uma combinação de $V'A$ e $V'D$ e é exibida como (COLLINS et al., 2021):

$$V'_E = V'_A + V'_D$$

Portanto, a resposta ventilatória no exercício (volume minuto expirado ou $V'E$) guarda íntima relação com os próprios determinantes da $PaCO_2$, como a taxa metabólica muscular, já que o aumento do volume de CO_2 vindo dos músculos aumentará a $V'CO_2$; o ponto médio em que a $PaCO_2$ é controlada pelos centros respiratórios (ponto-de-ajuste) - quanto mais baixa for a $PaCO_2$, maior será a ventilação alveolar necessária para mantê-la reduzida; e a fração do volume de ar inspirado (volume corrente ou VC) desperdiçado no espaço-morto pulmonar (EM).

Assim, pode-se dizer que:

$$V'E = 863 * V'CO_2 / PaCO_2 * (1 - VEM/VC)$$

Esta equação demonstra, simplesmente, que a ventilação pulmonar será maior quanto maior a taxa de produção periférica de CO_2 , menor o ponto de ajuste do CO_2 e maior o espaço-morto como fração do volume corrente (NEDER; NERY, 2002).

A relação Ventilação/Perfusão é a principal determinante da eficiência ventilatória e a engrenagem necessária para que ocorra a remoção de CO_2 produzido metabolicamente depende do funcionamento de complexos mecanismos, que passam desde ajustes acidobásicos, cardiovasculares, energéticos e neuro-químio sensíveis, que serão descritos a seguir.

2.1.1 Comando central e resposta ventilatória

Ao analisar a causa do aumento na ventilação, durante a atividade física, fica-se induzido a atribuir tal aumento às elevações sanguíneas do dióxido de carbono e dos íons de hidrogênio, somadas à redução do oxigênio sanguíneo, o que é questionável, pois as medidas da PCO_2 , do pH e da PO_2 arteriais revelam que nenhum desses valores se altera de forma significativa durante a atividade física e nenhum deles fica suficientemente anormal para estimular a respiração de modo tão intenso como observado durante exercícios vigorosos (GUYTON; HALL, 2006, p.537).

Os fatores neurogênicos para o controle ventilatório durante a atividade física incluem influências corticais e periféricas. O fluxo nervoso anterógrado proveniente de regiões do córtex

motor e ativação cortical como antecipação da atividade estimulam os neurônios respiratórios no bulbo para iniciar o aumento brusco da ventilação do exercício (MCARDLE et al, 2019, p.293). Na verdade, quando a pessoa começa a se exercitar, grande parte do aumento global da ventilação se inicia imediatamente com o começo da atividade física, antes que qualquer substância química sanguínea tenha tido tempo de se alterar. É provável que a maior parte do aumento da respiração se origine de sinais neurogênicos, transmitidos diretamente ao centro respiratório do tronco cerebral ao mesmo tempo que sinais neurais se dirigem aos músculos corporais para promoção da contração muscular (GUYTON; HALL, 2006, p.537).

Admite-se que o encéfalo, durante a transmissão de impulsos nervosos para os músculos participantes da atividade física, transmita ao mesmo tempo impulsos colaterais para o tronco cerebral, para estimular o centro respiratório. Isso é análogo à estimulação do centro vasomotor do tronco cerebral durante a atividade física indutora de aumento simultâneo na pressão arterial (GUYTON; HALL, 2006, p. 537).

2.1.2 Integridade quimiossensorial e resposta ventilatória

Quando a pessoa se exercita, sinais neurais diretos possivelmente estimulam o centro respiratório ao nível quase adequado para suprir o oxigênio suplementar para a atividade física e para extrair o dióxido de carbono adicional. Entretanto, esporadicamente, os sinais do controle respiratório neural são muito intensos ou muito débeis. Assim, os fatores químicos desempenham papel considerável para o ajuste final da respiração, necessário para equilibrar as concentrações de oxigênio, dióxido de carbono e íons hidrogênio dos líquidos corporais o mais próximo da normalidade (GUYTON; HALL, 2006, p.537).

Nem a estimulação química ou qualquer outro mecanismo isolado são responsáveis completamente pelo incremento da ventilação (hiperpneia) durante a atividade física; o controle clássico por retroalimentação da ventilação ao repouso mediados pelo O_2 e CO_2 não a explica. A indução de modificações máximas na acidez do plasma e na PO_2 e PCO_2 inspiradas não eleva a ventilação minuto até os valores existentes durante o exercício (MCARDLE et al, 2019, p.292).

No início da atividade física, a ventilação alveolar aumenta quase prontamente sem o implemento inicial na $PaCO_2$, essa elevação costuma ser ampla o suficiente a ponto de diminuir efetivamente a $PaCO_2$ abaixo da normal. O fator presumido para que a ventilação tome a dianteira da elevação de dióxido de carbono sanguíneo está no fato de o sistema nervoso central

estimular antecipadamente a respiração no início da atividade física, provocando ventilação alveolar extra antes de ela ser necessária. Contudo, após cerca de 30 a 40 segundos, a quantidade de dióxido de carbono liberada no sangue a partir dos músculos ativos se iguala, aproximadamente, ao aumento da frequência da ventilação, e a PaCO_2 retorna basicamente ao normal, mesmo com a continuidade da atividade física (GUYTON; HALL, 2006, p. 537).

Quando a intensidade do exercício aumenta, a PO_2 alveolar (arterial) não cai ao ponto de aumentar a ventilação através da estimulação dos quimiorreceptores. Os grandes volumes ventilatórios durante a atividade física intensa acarretam elevação da PO_2 alveolar até acima do valor médio de repouso, e qualquer acréscimo da PO_2 alveolar durante o exercício aumenta a oxigenação do sangue nos capilares alveolares. A ventilação pulmonar durante a atividade leve e moderada correlaciona-se intimamente ao metabolismo, proporcionalmente ao consumo de O_2 e à produção de CO_2 . Nessas condições, a PCO_2 alveolar (e arterial) em geral alcança em média 40mmHg. Durante a atividade vigorosa com seu componente anaeróbico, relativamente grande (acúmulo de lactato), as maiores concentrações de H^+ proporcionam um estímulo ventilatório adicional. A hiperventilação resultante reduz as PCO_2 alveolar e arterial, às vezes para um valor de apenas 25mmHg. Qualquer redução da PCO_2 arterial reduz o impulso ventilatório do CO_2 durante a realização de um exercício (MCARDLE et al, 2019, p.292).

Uma hipótese propõe que oscilações na PO_2 e PCO_2 arteriais possam estimular os quimiorreceptores periféricos ainda que o nível médio permaneça inalterado. Estas flutuações são causadas pela natureza periódica da ventilação e intensificam quando o volume corrente se eleva, como no exercício. Uma outra teoria seria a de que os quimiorreceptores centrais aumentam a ventilação para manter constante a PCO_2 arterial por algum tipo de servomecanismo (WEST, 2013, p.163).

2.1.3 Integridade neuromuscular na resposta ventilatória

Por influência periférica dos mecanorreceptores, o influxo sensorial proveniente de articulações, tendões e músculos influencia os ajustes ventilatórios, hiperpneia reflexa do exercício, durante todo o período do exercício (MCARDLE, et al, 2019, p.293). Acredita-se que uma parte adicional da estimulação seja resultado dos sinais sensoriais transmitidos para o centro respiratório dos músculos que se contraem e das articulações que se movem. Toda essa estimulação neural extra da respiração é normalmente suficiente para fornecer quase exatamente o aumento necessário na ventilação pulmonar requerido para manter os gases

respiratórios, o oxigênio e o dióxido de carbono, muito próximos do normal (GUYTON; HALL, 2006, p. 537).

Durante a atividade física, os movimentos altamente eficientes do diafragma, do gradil costal e dos músculos abdominais são sincronizados de forma a favorecer a inspiração e expiração. Com a inspiração a ação dos escalenos e intercostais externos elevam as costelas e as fazem rodar (movimento de alça de balde), e o volume inspirado aumenta com a descida do diafragma (MCARDLE et al, 2019, p.260).

O músculo diafragma é o mais importante da inspiração, lâmina muscular fina, inserido nas costelas inferiores, em forma de cúpula, é suprido pelos nervos frênicos provenientes dos segmentos cervicais 3, 4 e 5. Quando se contrai, os conteúdos abdominais são forçados para baixo e para frente, aumentando a dimensão vertical da cavidade torácica. Além disso, as margens costais são elevadas e movimentadas para fora, promovendo aumento no diâmetro transversal do tórax. Na respiração corrente normal, o nível do diafragma se move de 1cm, porém, na inspiração e expiração forçadas, pode ocorrer uma excursão total de até 10cm (WEST, 2013, p.111).

A expiração durante o repouso e atividade leve representa um processo passivo do movimento do ar para fora dos pulmões que ocorre pela desativação dos músculos inspiratórios e retração natural do tecido pulmonar distendido, o esterno e as costelas se movem para baixo e o diafragma para cima na direção da cavidade torácica, reduzindo assim seu volume, comprimindo o gás alveolar e o ar passa então para a atmosfera. Durante atividades intensas, os músculos intercostais internos e abdominais atuam vigorosamente sobre as costelas e a cavidade abdominal reduzindo as dimensões torácicas, tornando a expiração mais rápida (MCARDLE et al, 2019, p.260).

Os músculos respiratórios são fundamentais para a manutenção da ventilação pulmonar, que por sua vez contribui para a troca gasosa, essencial para a função dos músculos periféricos e manutenção do esforço. Além disso, há evidências de que a fadiga da musculatura respiratória, tanto dos músculos inspiratórios, quanto dos expiratórios, em alta intensidade do exercício, podem, através de aferências ao sistema nervoso central e por meio de metaborreflexo, desencadear aumento da atividade simpática, causando prejuízo de fluxo sanguíneo por vasoconstrição aos músculos envolvidos na atividade, com conseqüente limitação ao exercício, interferindo assim na *performance* (ROMER et al., 2006; TAYLOR; ROMER, 2008). Esse é um importante mecanismo para manutenção do fluxo sanguíneo para os músculos respiratórios e preservação da eficiência ventilatória.

2.1.4 Integração cardiovascular

O comando central neural acima da região bulbar inicia as alterações cardiovasculares imediatamente antes e por ocasião do início do movimento. Ocorre incremento na FC e na contratilidade miocárdica decorrente ao influxo anterógrado proveniente desse centro que suprime também a ativação parassimpática (MCARDLE et al, 2019, p.341).

Atletas apresentam de 10 a 15% de aumento no tamanho da cavidade do ventrículo, além de aumento do enchimento diastólico refletindo maior volume sistólico quando comparado a indivíduos de idade e tamanho similares (MAZAHARI et al., 2021). O atleta de *Endurance* alcança grande débito cardíaco máximo exclusivamente por meio de um grande volume sistólico, e esse por sua vez revela fundamental importância para as diferenças de $\dot{V}O_2$ entre os indivíduos (MCARDLE et al, 2019, p.348).

O débito cardíaco é dependente do volume sistólico e FC. O Pulso de O_2 (PuO_2) é a relação do $\dot{V}O_2$ (ml/min) e FC em batimentos/min, expresso como mL/bat. De acordo com a equação de Fick:

$$\dot{V}O_2 = (FC \times SV) \times C(a-v) O_2,$$

onde SV é o volume sistólico e $C(a-v) O_2$ é a diferença artério-venosa de O_2 .

Sendo assim, o PuO_2 prevê uma estimativa do volume sistólico e a perfusão/extração periférica em resposta ao exercício. Valores normais ao repouso variam de 4 a 6 mL/bat e aumentam para 10 a 20 mL/bat durante o exercício (MAZAHARI et al., 2021).

$$PuO_2 = \dot{V}O_2 / FC$$

$$PuO_2 = \frac{(FC \times SV) \times C(a-v) O_2}{FC}$$

$$PuO_2 = SV \times C(a-v) O_2$$

O pulso de oxigênio (mL/min/bat) consiste, teoricamente, no volume de O_2 extraído pelo metabolismo a cada batimento cardíaco. Logo, depende do volume de sangue oferecido (ou seja, do volume de ejeção sistólico ou VES) e da capacidade tissular em absorver o O_2 (isto é, da diferença entre os conteúdos arterial e venoso misto de O_2 ou $C(a-v) O_2$). O PuO_2 aumenta progressivamente com o exercício, já que ambos os seus determinantes (VS e $C(a-v)$)

O₂) elevam-se (NEDER; NERY, 2002). Encontra-se reduzido em condições que levam a um comprometimento do débito cardíaco durante o exercício, como na insuficiência cardíaca crônica, tanto a nível do limiar anaeróbio como no pico do esforço (COSTA et al., 2005). Valores de PuO₂ sugeridos por Petek et al (2022) em atletas, após estudo para estabelecer referências nessa população de acordo com idade, gênero e ergômetro utilizados vão de 22,2 a 23,9 mL/bat em homens e 13,7 a 16,3 mL/bat para mulheres, entre idades de 18 a 60 anos.

Simultaneamente as adaptações cardíacas, ocorrem alterações previsíveis no fluxo sanguíneo regional que são proporcionais a intensidade do exercício. A modulação da dilatação e da constrição vasculares direciona o fluxo sanguíneo para áreas mais demandadas ao mesmo tempo que mantém a Pressão Arterial através de todo o sistema arterial. Pela continuação da atividade, a retroalimentação para o bulbo, a partir de receptores mecânicos e químicos periféricos existentes no tecido ativo, considera o metabolismo tecidual e as necessidades circulatórias. Fatores metabólicos locais operam no sentido de dilatar os vasos nos músculos ativos. A vasodilatação diminui a resistência periférica, com objetivo de proporcionar maior fluxo sanguíneo nessas áreas. O fluxo sanguíneo arterial através dos músculos ativos prossegue em oscilações pulsáteis que favorecem um aumento do fluxo durante as contrações musculares excêntricas (de alongamento) e/ou as fases de recuperação de uma contração concêntrica (de encurtamento). Também acontecem ajustes constritores de mediação central na árvore vascular dos tecidos inativos, incluindo pele, rins, a região esplâncnica e músculo inativo. A ação constritora condiciona uma pressão de perfusão adequada no músculo ativo ao mesmo tempo que implementa o suprimento sanguíneo para atender as demandas metabólicas (MCARDLE et al, 2019, p.341).

2.2 Eficiência Ventilatória na população clínica

A eficiência ventilatória se tornou uma variável comum determinada no TECP, e em conjunto com outras variáveis-chave, como volumes pulmonares tem se mostrado como ferramenta para estabelecer o prognóstico, bem como sua relação com a mortalidade, de doenças como insuficiência cardíaca, hipertensão pulmonar e na doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) (DAVIS et al., 2006; PHILLIPS; COLLINS; STICKLAND, 2020).

Ao avaliar a dispneia em pacientes com doença cardíaca ou pulmonar, é importante medir a quantidade de ventilação necessária para eliminar o CO₂ produzido metabolicamente (a eficiência ventilatória). Matematicamente, a relação entre a ventilação (\dot{V}_E) e a produção de

CO₂ é determinada pela pressão arterial de CO₂ e a relação espaço morto fisiológico-volume corrente (SUN et al., 2002).

Um aumento da $V'E/V'CO_2$ slope pode ser de origem indeterminada (hiperventilação primária) ou devido a alterações respiratórias ou cardíacas que induzem a um distúrbio da ventilação/perfusão. Um incremento de $V'E/V'CO_2$ slope é classicamente observado em pacientes com insuficiência cardíaca crônica e aqueles com hipertensão pulmonar de diferentes etiologias, com valores progressivamente mais altos em manifestações severas da doença. Inversamente, um deslocamento para baixo da $V'E/V'CO_2$ slope ocorre quando o ponto de ajuste da PaCO₂ é elevado (hipoventilação alveolar primária) (MEZZANI, 2017).

Os equivalentes ventilatórios ao nível do limiar de lactato estimado (limiar ventilatório 1), principalmente o $V'E/V'CO_2$, têm também sido utilizados como indicadores da eficiência ventilatória, do grau de adequação da resposta ventilatória aos estímulos metabólicos. Tais valores são sexo e idade dependentes, sendo maiores em mulheres e idosos (NEDER; NERY, 2002). Nos indivíduos mais velhos, o valor elevado de $V'E/V'CO_2$ é consequente ao aumento do espaço morto, secundário a alterações da interface alvéolo-capilar, volume de sangue capilar e na relação ventilação/perfusão. No entanto, a ineficiência ventilatória relacionada a idade não é a causa primária de limitação de exercício em indivíduos saudáveis mais velhos. (PHILLIPS; COLLINS; STICKLAND, 2020).

A eficiência ventilatória prejudicada resultante de exercícios de baixa a média intensidade, foi associada com respostas hemodinâmicas anormais e a doenças cardiovasculares numa população com fração de ejeção preservada de ventrículo esquerdo. $V'E/V'CO_2$ slope e suas correlações clínicas diferiram de acordo com a intensidade do exercício, com clara vantagem da utilização de $V'E/V'CO_2$ nadir para evitar os fatores de confusão relacionados aos períodos precoces de hiperventilação do exercício, e tardio, proporcionados pela maior aptidão e melhor função pulmonar. De fato, maiores valores de $V'E/V'CO_2$ slope, na fase tardia do exercício, foram associados com altos níveis de aptidão física ($V'O_2$ pico), baixo risco metabólico e melhor função pulmonar (NAYOR et al., 2020).

Foi observado uma forte relação dos fatores de risco cardiovasculares e futuros fatores de risco utilizando $V'E/V'CO_2$ pre-VAT slope ($V'E/V'CO_2$ pré limiar anaeróbio ventilatório) ou $V'E/V'CO_2$ nadir, ao invés do slope total ao longo do exercício. Essas medidas de eficiência ventilatória acessadas numa fase inicial até o meio do exercício são específicas e relativas aos

riscos cardiovasculares na comunidade, respostas hemodinâmicas características decorrentes de insuficiência cardíaca e sobrevida livre de eventos cardiovasculares (NAYOR et al., 2020).

Sun et al (2002) recomenda o uso do índice $V'E/V'CO_2$ nadir para a medida não invasiva de eficiência ventilatória em adultos saudáveis, visto ser bastante robusto por não ser afetado pelo tipo de ergômetro, diferenças de idade, sexo, estatura, equipamento e locais de realização do teste, inclusive quando comparado $V'E/V'CO_2$ slope abaixo do ponto de compensação ventilatória, comumente utilizado por cardiologistas (para estimar a severidade da insuficiência cardíaca), e com a relação $V'E/V'CO_2$ ao nível do limiar anaeróbio, preferido por pneumologistas (SUN et al., 2002).

Nos indivíduos com alterações pulmonares, restrições mecânicas coexistem com aumento na pressão parcial arterial de dióxido de carbono (DPOC avançada), com consequente achatamento da resposta ventilatória desses indivíduos (MULLER; SARAIVA, 2018) num cenário complexo de condição pulmonar altamente heterogênea, ou seja, a relação $V'E/V'CO_2$ pode paradoxalmente, diminuir à medida que a doença evolui e as anormalidades mecânicas pioram. O $V'E/V'CO_2$ nadir também pode não refletir com precisão a extensão da ineficiência ventilatória, pois a inclinação e a intercepção podem mudar em direções opostas e potencialmente se anularem, ou seja, o nadir se tornaria estável apesar da progressão da DPOC. Como outra questão complicada, um nadir alto pode ser resultado de um teste muito curto, no qual o perfil decrescente pode ser amputado pela interrupção prematura do exercício em pacientes gravemente limitados (NEDER et al., 2015).

Na insuficiência cardíaca isolada, a progressão da doença está associada a um $V'E/V'CO_2$ mais alto devido a um VD/VT (volume de espaço morto/volume corrente) alto e um aumento do impulso ventilatório que leva à Hipocapnia em combinações variáveis, é então, razoável supor que pacientes com DPOC e insuficiência cardíaca com maior ineficiência ventilatória apresentem uma combinação deletéria de maior VD/VT e menor PaCO₂ do que seus homólogos com menor $V'E/V'CO_2$ (ROCHA et al., 2017).

Considerando as limitações do conceito atual de eficiência ventilatória e sua dependência da expansão volume corrente, foi recentemente proposto uma nova abordagem para a medida da eficiência ventilatória ($\eta V'E$), que leva em consideração a taxa de remoção de CO₂ para cada aumento de 10 vezes na ventilação-minuto, $V'CO_2\text{-log}10V'E$, corrigida para a máxima taxa teórica de remoção do CO₂ ao nível da ventilação voluntária máxima (VVM) predita. O novo método estudado é altamente sensível à deterioração da Ventilação/Troca

Gasosa ao longo de uma função pulmonar prejudicada como em indivíduos mais graves com DPOC (MULLER; SARAIVA, 2021).

2.3 Eficiência Ventilatória em atletas

Vários mecanismos para hiperventilação compensatória em atletas são possíveis. Primeiro, fadiga da musculatura respiratória: estudos mostram evidências de fadiga muscular respiratória durante exercícios pesados em indivíduos saudáveis (DEMPSEY et al., 2006; ROMER et al., 2006; TAYLOR; ROMER, 2008). Entretanto, dados experimentais relacionando a fadiga a inadequada hiperventilação são escassos. Segunda hipótese, alteração da função de quimiorreceptores, sendo que prévios estudos em atletas foram inconclusivos e inconsistentes de que um reflexo embotado é preditivo de inadequada resposta hiper ventilatória ao exercício (DEMPSEY; WAGNER, 1999). Terceira, restrições ventilatórias mecânicas: evidências de obstrução ao fluxo expiratório e restrições mecânicas, próximo a taxas máximas ventilatórias têm sido demonstradas em jovens saudáveis, homens e mulheres, treinados. A ventilação minuto ($V'E$) é limitada por certas condições como a resistência das vias aéreas ao nível do exercício máximo (CAILLAUD et al., 1993; COLLINS et al., 2021). Importantes trabalhos mostraram que quando o nitrogênio é substituído por hélio no gás inspirado (menos denso promove um melhor fluxo de ar), atletas de resistência alcançaram maior $V'E$, $V'E/V'CO_2$ mais alta e $PaCO_2$ menor no exercício máximo, o que suporta a hipótese de restrições mecânicas serem a causa primária de hiperventilação inadequada em atletas treinados (BUONO; MALY, 1996; COLLINS et al., 2021). Essa condição pode desencadear hiperinsuflação dinâmica e incremento de forças elásticas, complacência pulmonar reduzida, e consequente fadiga dos músculos respiratórios, por aumento do custo energético, além de trabalharem em situação de desvantagem mecânica (redução de comprimento das fibras musculares) (JOHNSON; SAUPE; DEMPSEY, 1992; GUENETTE et al., 2007; COLLINS et al., 2021).

A inclinação de $V'E/V'CO_2$ medida durante o tempo total do exercício tem apresentado resultados inconsistentes em atletas, excesso de ventilação, com valores acima dos normais, suscitando incertezas sobre a saúde do sujeito, ou sobre os valores aceitos como usuais para essa população, pois em virtude da aptidão cardiorrespiratória, atletas são capazes de sustentar o esforço muito além do PCR, aumentando $V'E$ para remoção de CO_2 (PETEK, 2020). Em indivíduos saudáveis, tem sido demonstrado variação nos valores de $V'E/V'CO_2 slope$, de 19 à 32 (SUN et al., 2002).

Apesar da eficiência ventilatória estar bem descrita na população clínica, seu papel e a sua importância no desempenho esportivo permanecem controverso, pois supõe-se que a maior eficiência para eliminação de CO_2 durante o esforço físico permita uma melhor performance do indivíduo e esteja relacionada ao consumo máximo de oxigênio ($\dot{V}\text{O}_2 \text{ max}$) (SALAZAR-MARTÍNEZ et al., 2018). No entanto, em ciclistas juvenis de elite, nenhuma relação foi encontrada entre o consumo máximo de oxigênio ($\dot{V}\text{O}_2 \text{ max}$) e $\dot{V}\text{E}/\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope}$ (BROWN et al., 2013). Da mesma forma, foi relatado que o desempenho de ciclistas de classe mundial ao longo de três temporadas não foi relacionado à mudanças na inclinação $\dot{V}\text{E}/\dot{V}\text{CO}_2$ (SALAZAR-MARTÍNEZ et al., 2016). Dados de Salazar-Martínez et al (2018), revelaram que a performance de atletas de *endurance* não estava relacionada à resposta da eficiência ventilatória, e que esse índice se comportou de maneira similar, independentemente do nível de condicionamento físico, idade, índice de massa corpórea e do ergômetro utilizado.

3. HIPÓTESE

Neste estudo, levantamos a possibilidade de existir uma associação mais forte entre as respostas cardiometabólicas do teste de exercício cardiopulmonar, tais como consumo máximo de O_2 e Pulso de O_2 , com as novas métricas de eficiência ventilatória quando comparadas com as convencionais.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo Principal

Analisar a relação entre eficiência ventilatória e respostas cardiometabólicas do exercício (PuO_2 e $\dot{V}\text{O}_2$ máximo) em atletas.

4.2 Objetivos Secundários

- ✓ Avaliar a eficiência ventilatória através dos novos métodos, $\text{CO}_2\text{-ACR}$ e $\eta\dot{V}\text{E}$, em atletas, no teste incremental máximo;
- ✓ Avaliar a eficiência ventilatória através do $\dot{V}\text{E}/\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope}$ e $\dot{V}\text{E}/\dot{V}\text{CO}_2$ nadir em atletas, no teste incremental máximo;
- ✓ Analisar a relação entre os índices de eficiência ventilatória e o desempenho dos atletas, na prova de corrida de 10Km.

5. METODOLOGIA

5.1 Desenho do Estudo e Indivíduos

Esse foi um estudo observacional, transversal e retrospectivo e utilizou as bases de dados secundários de dois outros estudos: o primeiro, Estudo – **MEDALHA**, pesquisa e extensão, voltado para alunos da UFMS e atletas de alto rendimento de Mato Grosso do Sul e participantes do Bolsa Atleta, e o segundo, Estudo – **BRASÍLIA**, vinculado a um pesquisador da Universidade Católica de Brasília, cujo propósito foi desenvolver modelos para explicar o desempenho de praticantes de corrida (DEL ROSSO et al., 2021).

O estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da UFMS (Certificado de Apresentação de Apreciação Ética, nº 63215822.2.0000.0021).

Os indivíduos dos estudos foram selecionados de forma não probabilística e por conveniência, sendo submetidos a TECP com protocolos descritos a seguir, de onde foram coletadas as variáveis de eficiência ventilatória, PuO_2 e $V'O_2$ máximo, para análise de correlação. Além disso, parte dos sujeitos (25 corredores) participaram de uma prova de corrida de 10Km em que foi computado o tempo de prova para avaliar a possível correlação com o desempenho.

5.2 Critérios de Inclusão e Exclusão

A amostra foi de sessenta e três testes incrementais (TECP) referente a indivíduos dos sexos masculino e feminino, praticantes de diversas modalidades esportivas e que realizavam treinamentos físicos sistemáticos, dedicando-se a várias horas de treino diário e semanal (mínimo de 4x/semana) com intuito de melhorar o desempenho físico. Foram excluídos dois testes por erro para análise de regressão linear no programa R, empregado para cálculo da eficiência ventilatória utilizando escala logarítmica.

5.3 População Estudada

5.3.1 População Estudo -MEDALHA

Vinte e nove indivíduos participantes do projeto MEDALHA, dos sexos masculino e feminino, com idades entre 19 e 53 anos, praticantes de diversas modalidades esportivas (22 praticantes de corrida, 6 de ciclismo e 1 de natação).

Os participantes foram comunicados dos procedimentos e assinaram Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), em conformidade com a Declaração de Helsink. O estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética da UFMS (Certificado de Apresentação de Apreciação Ética nº 79957217.6.0000.0021). Os dados coletados entre setembro de 2018 e abril de 2019.

5.3.2 *População Estudo- BRASÍLIA*

Trinta e dois corredores de resistência, do sexo masculino, com idades entre 18 e 42 anos, que treinavam e competiam em eventos que variavam de 10 Km a meia maratona, há pelo menos 3 anos.

Os participantes foram comunicados dos procedimentos e assinaram TCLE em conformidade com a declaração de Helsink. O estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética da Universidade Católica de Brasília (Certificado de Apresentação de Apreciação Ética nº 67650017.0.1001.0029). Os dados foram coletados entre os meses de julho e dezembro de 2017.

5.4 **Teste de Exercício Cardiopulmonar (TECP)**

5.4.1 *Protocolo TECP: Estudo- MEDALHA - Laboratório da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul*

O TECP sintoma limitado foi realizado em sala climatizada ($21 \pm 1,2^{\circ}\text{C}$), no Laboratório de Fisiopatologia Respiratória – LAFIR, do Departamento de Pneumologia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), em esteira rolante Imbrasport. Foi adotado protocolo incremental, iniciando-se com fase de aquecimento de 5 min a 8 km/h e com descanso de 5-10 minutos (homens e mulheres), seguida pela fase de exercício, em que os homens iniciaram com 8 km/h a 15km/h, e mulheres com 6-7 a 13km/h (1% de inclinação), com incrementos fixos de 1,5 km/h a cada 2 minutos até a exaustão voluntária ou escala de percepção de esforço=20 e/ou frequência cardíaca máxima (definida pela fórmula 220-idade ou atingir o platô do consumo de oxigênio).

Os dados metabólicos e ventilatórios como consumo de oxigênio respiração a respiração ($V'O_2$), dióxido de carbono exalado $V'CO_2$, volume minuto ($V'E$), seus componentes de frequência respiratória (fR) e o volume corrente (VC) foram medidos por um sistema metabólico Encore Vmax™ 29 (*Sensor Medics, Yorba Linda, CA, EUA*), calibrado com quatro concentrações sucessivas (Gases de Alta Precisão, GAMA GASES™, São Paulo, Brasil). A frequência cardíaca (FC) foi monitorada por meio de um sistema de ECG (Cardiosoft®, EUA, 2012). O monitoramento periférico contínuo de oximetria digital (SpO_2) foi realizado por um sistema DIXTAL DX2010 (DIXTAL, Manaus, Brasil, 2010).

5.4.2 Protocolo TECP: Estudo- BRASÍLIA - Laboratório Universidade Católica de Brasília

Os indivíduos foram submetidos a um teste máximo de corrida, em esteira monitorizada (Super ATL, Imbramed, Brazil). Resumidamente, o protocolo iniciou com 4 min de aquecimento a uma velocidade de 8.0Km/h. Subsequentemente, a velocidade foi acrescida em 0.5Km/h a cada 30s até a impossibilidade em manter a velocidade de corrida estabelecida (exaustão). Todos os testes foram realizados em laboratório - ambiente climatizado (22° C). Os dados ventilatórios e metabólicos foram coletados utilizando um sistema metabólico respiração a respiração - *breath-by-breath metabolic cart* (*Cortex Metalyzer 3B, Cortex, Leipzig, Germany*). A frequência cardíaca foi continuamente monitorada por meio de Sistema de ECG de 5 derivações (MicroMed, ECG Digital, Brazil).

5.5 Prova de Corrida de 10Km

Para avaliar a associação das variáveis de eficiência ventilatória e performance, além dos parâmetros cardiometabólicos do TECP, foi analisado o tempo total da prova de corrida de 10 Km de 25 corredores. Os testes de corrida foram realizados em uma pista de atletismo entre 7:30 e 10h, sendo que cada atleta foi avaliado individualmente. Antes do teste os atletas foram equipados com um monitor de FC telemétrico (Polar V800, *Polar Electro Oy, Finland*), que inclui um monitor integrado de Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System - GPS*). Na sequência, os participantes realizaram um aquecimento composto de 10 minutos de corrida a 60% da FC de reserva e mais 2 a 3 minutos a uma intensidade de 70-80% da FC de reserva.

5.6 Parâmetros Cardiometabólicos

O $\dot{V}O_2$ max foi definido como a média do consumo de oxigênio registrado durante os últimos 20s do estágio completo do teste. Os dados de $\dot{V}O_2$ foram calculados a partir de médias de cinco respirações.

O PuO_2 foi definido como a média registrada durante os último 10s do estágio completo do teste e corrigido por área de superfície corpórea (ASC) dos participantes (método DuBoi).

5.7 Estratificação dos Grupos Segundo Valores de $\dot{V}O_2$ e PuO_2

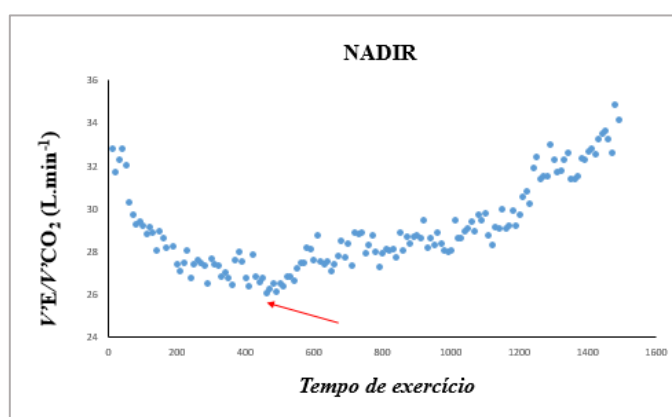
Os participantes foram divididos em grupos de acordo com valores da mediana de $\dot{V}O_2$ e PuO_2 (corrigido por ASC), acima ou abaixo do ponto de corte em 57.8 ml/min/Kg e 11.5 ml/bpm/m², respectivamente, para posterior comparação dos valores de eficiência ventilatória métodos novos (ηVE e CO_2 -ACR) e convencionais ($\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ slope e $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ nadir).

5.8 Determinação da Eficiência Ventilatória (Método Usual)

5.8.1 $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ nadir

O ponto nadir é o mais baixo da relação $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ ao longo do TECP. $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ é elevada durante exercícios leves ao início do teste e diminui progressivamente, simultaneamente com VD/VT , ao seu menor valor, antes do ponto de compensação respiratória (WHIPP; WARD, 1982). Em indivíduos saudáveis, o $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ nadir e o $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ correspondente ao limiar anaeróbio são frequentemente similares (SUN et al., 2002).

FIGURA 1 - Gráfico de Dispersão Exemplificando o Ponto Mais Baixo (nadir) da Relação de $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ por Tempo

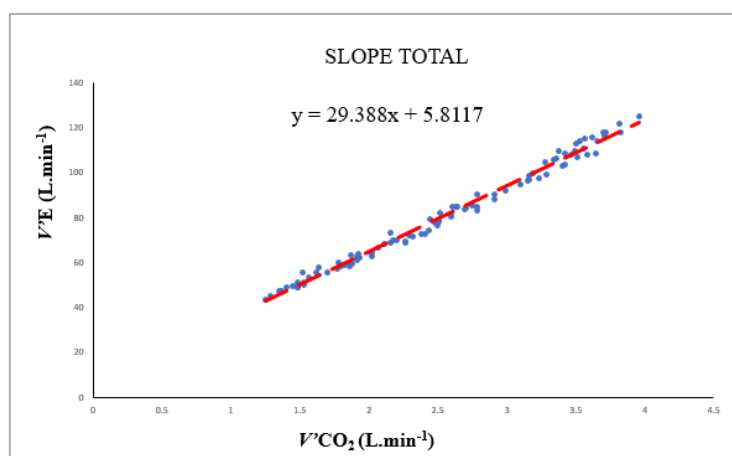


FONTE: A autora, 2022.

5.8.2 $V'E/V'CO_2$ slope total

Durante o exercício incremental sintoma limitado (TECP), a relação $V'E/V'CO_2$ pode ser estabelecida plotando $V'E$ (eixo y) relativa à $V'CO_2$ (eixo x) e determinada pela análise da inclinação (*slope*) dessa relação por meio de regressão linear (PHILLIPS; COLLINS; STICKLAND, 2020a). Pesquisas prévias têm demonstrado que os limites de normalidade inferior e superior variam entre, aproximadamente, 21 a 31 respectivamente (SUN et al., 2002).

FIGURA 2 - Gráfico de Dispersão com Linha de Tendência e Exemplo de Equação de Regressão Linear para Determinação do *slope* da Relação $V'E/V'CO_2$.



FONTE: A autora, 2022.

5.8.3 $V'E/V'CO_2$ slope 1

$V'E/V'CO_2$ slope 1 foi calculado até o PCR (limiar ventilatório 2), definido como a perda de linearidade entre $V'E$ e $V'CO_2$ e o maior valor da pressão expirada de CO_2 antes do seu decréscimo.

5.9 Determinação da Eficiência Ventilatória (Novo Método)

5.9.1 CO_2 -ACR (Taxa Real Constante de Remoção de CO_2)

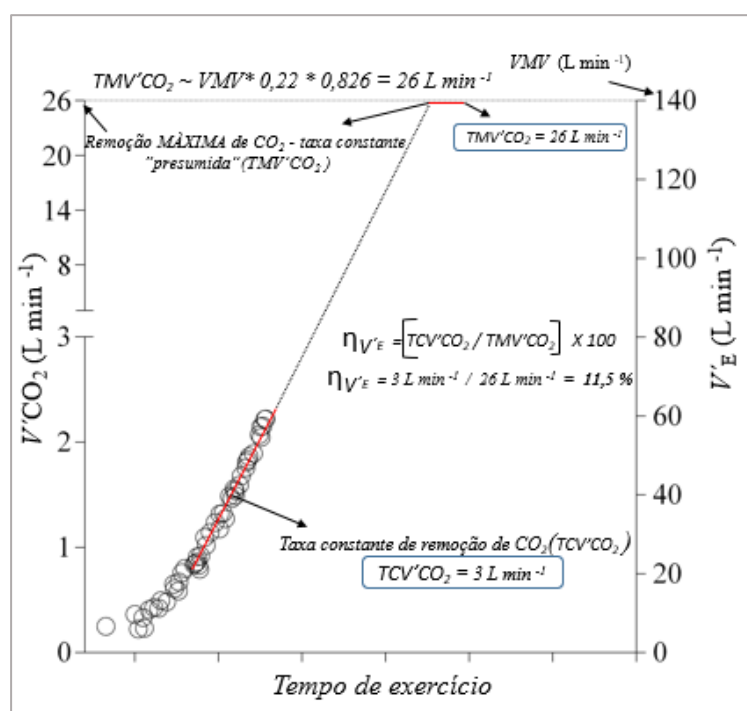
Adotou-se a saída de CO_2 como variável dependente (eixo y) e $V'E$ como variável independente (eixo x) e para atingir uma taxa semi-constante de emissão de CO_2 , tomou-se o log10 do $V'E$. Durante essa construção semi-logarítmica, o sinal $V'CO_2/V'E$ é descrito por uma função quadrática com o componente final da equação, descrita com confiança por uma função

linear verdadeira. Esse coeficiente de inclinação é denominado como taxa real constante de remoção de CO_2 ($\text{CO}_2\text{-ACR}$); para isso foi desenvolvido um software personalizado no ambiente de programação R® com alta confiabilidade para determinação da inclinação que descreve a taxa de emissão de CO_2 durante o exercício gradual, para cada aumento de dez vezes na $V'E$ (MULLER; SARAIVA, 2021).

5.9.2 $\eta V'E$ (Eficiência Ventilatória, %)

Compara-se o valor da inclinação que descreve a taxa constante de emissão de CO_2 a um valor máximo teórico, ou seja, $\eta V'E=100\%$, que pode ser calculado de forma prática, usando-se a VVM prevista da seguinte forma: $\text{CO}_2\text{-MCR} = \text{MVV} * \max \text{FECO}_2 * 0.826$, ou $\text{CO}_2\text{-MCR} = \text{MVV} * 0.22 * 0.826$, em que as constantes 0,22 e 0,826 correspondem à fração máxima possível expirada de CO_2 e fator de conversão ATPS-STPD, respectivamente (MULLER; SARAIVA, 2021).

FIGURA 3 - Representação Gráfica Para Exemplificar o Cálculo Para Eficiência Ventilatória $\eta V'E$



FONTE: MULLER; SARAIVA, 2021. $V'CO_2$, remoção de dióxido de carbono; $V'E$, volume minuto expirado; VMV, ventilação máxima voluntária; $TMV'CO_2$, taxa máxima presumida de remoção de dióxido de carbono; $TCV'CO_2$, taxa constante de remoção de dióxido de carbono; $\eta V'E$, Eficiência Ventilatória (%). Neste gráfico de três eixos, a ventilação- minuto foi exibida sem escala logarítmica e à direita para melhor exemplificar. A regressão linear da porção linear da função quadrática está retratada em vermelho, e o coeficiente linear ou a taxa real constante de remoção de CO_2 ($\text{CO}_2\text{-ACR}$ ou $TCV'CO_2$) é igual a 3L/min para esse sujeito em específico. A VMV prevista para esse sujeito é de 140L/min e a remoção teórica máxima possível de CO_2 predita, baseada na VMV ($\text{CO}_2\text{-MCR}$ ou $TMCV'CO_2$), seria de 26L/min. Assim, $(\text{CO}_2\text{-ACR} / \text{CO}_2\text{-MCR}) * 100 = 11,5\%$.

5.10 Análise dos Dados e Estatística

Os dados contínuos foram expressos como média \pm desvio padrão (DP). Todas as variáveis contínuas foram analisadas quanto à normalidade de distribuição pelo Teste de Shapiro-Wilk. Os participantes foram divididos em grupos de acordo com valores da mediana de $\dot{V}O_2$ e PuO_2 (corrigido por ASC), acima ou abaixo do ponto de corte em 57.8 ml/min/Kg e 11.5 ml/bpm/m², respectivamente. Testes t de Student não pareados foram realizados para a comparação das médias entre os estratos de PuO_2 e $\dot{V}O_2$. Para avaliar as relações uni-variadas entre as variáveis de eficiência ventilatória, $\dot{V}O_2$, PuO_2 e tempo de corrida de 10 Km, foram utilizados o teste produto-momento de Pearson ou o teste do coeficiente de correlação Spearman. A significância bicaudal foi determinada, usando-se um nível alfa definido em 0,05. O programa estatístico SPSS 20.0 foi utilizado para todas as análises estatísticas (SPSS, IBM Corp®, EUA, 2011).

As amostras individuais dos intervalos de exercício para as principais variáveis foram analisadas respiração a respiração, sendo excluídos valores superiores a 3 vezes o desvio padrão da média local. Para as variáveis ventilatórias, a inclinação e o intercepto da razão $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ foram obtidos por regressão linear simples do tipo: $\dot{V}E = a * \dot{V}CO_2 +/- b$, com “a” correspondendo à inclinação da relação, e “b” ao valor do intercepto, incluindo dados do exercício de carga até o pico. $\dot{V}E/\dot{V}CO_2 slope$ 1 foi calculado até o PCR (limiar ventilatório 2), definido como a perda de linearidade entre $\dot{V}E$ e $\dot{V}CO_2$, e o maior valor da pressão expirada de CO_2 antes do seu decréscimo. O ponto nadir da relação $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ foi o mais baixo ao longo do tempo total do teste. De acordo com nossa hipótese, também avaliamos dois novos parâmetros ventilatórios: a taxa constante de remoção de CO_2 (CO_2 -ACR) e a eficiência ventilatória (ηV_E). Resumidamente, o CO_2 -ACR foi obtido de maneira semelhante à descrita para a inclinação da eficiência do consumo de oxigênio, ou seja, tomando-se o logaritmo de base 10 de $\dot{V}E$ no eixo x contra $\dot{V}CO_2$ no eixo y. Essa relação resulta em uma função quadrática característica na maioria dos casos. O parâmetro “b” da parte linear da equação tipo $\dot{V}CO_2 = a * \dot{V}E^2 + b * \dot{V}E + c$ foi denominado CO_2 -ACR. Para calcular ηV_E , este valor de “b” foi tomado como uma porcentagem de um valor teórico previsto de máximo possível $\dot{V}E$ sob condições hipotéticas, ou seja, um teto estimado de $\dot{V}CO_2$ no nível da VVM.

6. RESULTADOS

Neste estudo, analisamos uma amostra de 61 testes referentes a atletas, com média de idade de $32 \pm 8,3$ anos. Em sua maioria, eram 54 corredores (88% da amostra), 06 ciclistas e 01 nadador. Apenas três mulheres participaram do estudo. As características adicionais da amostra estão descritas na Tabela 1. A média do $V'O_2$ foi de $55,5 \pm 7,4$ mL/min/Kg foi associado a um PuO_2 de $21,5 \pm 3,6$ mL/bpm. Outros resultados do TECP podem ser observados na Tabela 1.

TABELA 1 - Dados Demográficos e Variáveis do Teste Máximo Incremental

Tabela 1. Características dos Participantes		
	Média	± DP
Idade (anos)	32	± 8,3
IMC (Kg/m ²)	22,7	± 2,7
Estatura (cm)	174,4	± 6,95
Massa corporal (Kg)	69	± 10,6
<i>Teste máximo incremental</i>		
$V'O_2$ (L/min)	3,85	± 0,55
$V'O_2$ (mL/min/Kg)	55,5	± 7,4
VT (L)	2,49	± 0,44
FC Max (bpm)	196	± 19,8
FR (rpm)	58	± 10
$V'E$ (L/min)	141,6	± 22,22
Pulso (mL/bpm)	21,5	± 3,6
$V'E / V'CO_2$ (pico)	32,4	± 3,2
$V'E / V'O_2$ (pico)	36,14	± 4,38

Valores expressos em média e desvio padrão. IMC, índice de massa corpórea; FC, frequência cardíaca; VO_2 , consumo de O_2 ; VT, volume corrente; FR, frequência respiratória; $V'E$, volume expirado no minuto; $V'E/V'CO_2$, equivalente ventilatório de dióxido carbono; $V'E/V'O_2$, equivalente ventilatório de oxigênio.

Os indivíduos foram divididos em estratos de acordo com valores mais altos ou mais baixos de $V'O_2$, sendo o ponto de corte em $57,8$ mL/min/Kg, e para valores de PuO_2 , corrigido pela área de superfície corpórea (ASC), com corte em $11,5$ ml/bpm/m² para comparação dos dados de eficiência ventilatória, métodos novos (ηVE e CO_2 -ACR) e convencionais ($V'E/V'CO_2$ slope 1, $V'E/V'CO_2$ slope total e $V'E/V'CO_2$ nadir) e estão à mostra na Tabela 2.

TABELA 2 - Comparação Entre Valores de Eficiência Ventilatória e Níveis de $V'O_2$ ($< 57,8$ ml/min/Kg e $\geq 57,8$ ml/min/Kg) e PuO_2 ($< 11,5$ ml/bpm e $\geq 11,5$ ml/bpm/m²) em Atletas.

N	GRUPO	COVARIÁVEIS				EFICIÊNCIA		VENTILATÓRIA	
		$V'O_2$	Idade	IMC	$\eta V'E$	Slope T	Slope 1	Nadir	CO ₂ ACR
31	G1 $V'O_2 < 57,8$	50,3 ± 5,1	35,2 ± 8,6	24,6 ± 2,3	21,7 ± 6,5	32,6 ± 4,4	28,4 ± 5,3	26,8 ± 3,3	6,6 ± 1,8
30	G2 $V'O_2 \geq 57,8$	62,0 ± 3,9	28,9 ± 6,9	21,0 ± 1,7	24,2 ± 7,4	36,2 ± 5,5	32,3 ± 6,7	27,9 ± 3,3	8,0 ± 2,5
		p<0,0001*	p<0,002*	p<0,001*	p = 0,09	p=0,0006*	p=0,013*	p= 0,207	p=0,005*
		PuO₂							
30	G1 Pulso /ASC< 11,5	10,3 ± 0,9	32,2 ± 8,6	22,5 ± 2,8	20,5 ± 5,4	34,3 ± 4,4	30,1 ± 5,5	27,7 ± 2,9	6,6 ± 1,9
31	G2 Pulso /ASC ≥ 11,5	13,1 ± 1,3	32 ± 8,4	23 ± 2,7	25,2 ± 7,7	34,4 ± 6,1	30,6 ± 7,3	26,8 ± 3,6	8,0 ± 2,4
		p<0,001*	p = 0,927	p = 0,475	p=0,001*	p = 0,936	p=0,994	p= 0,222	p=0,003*

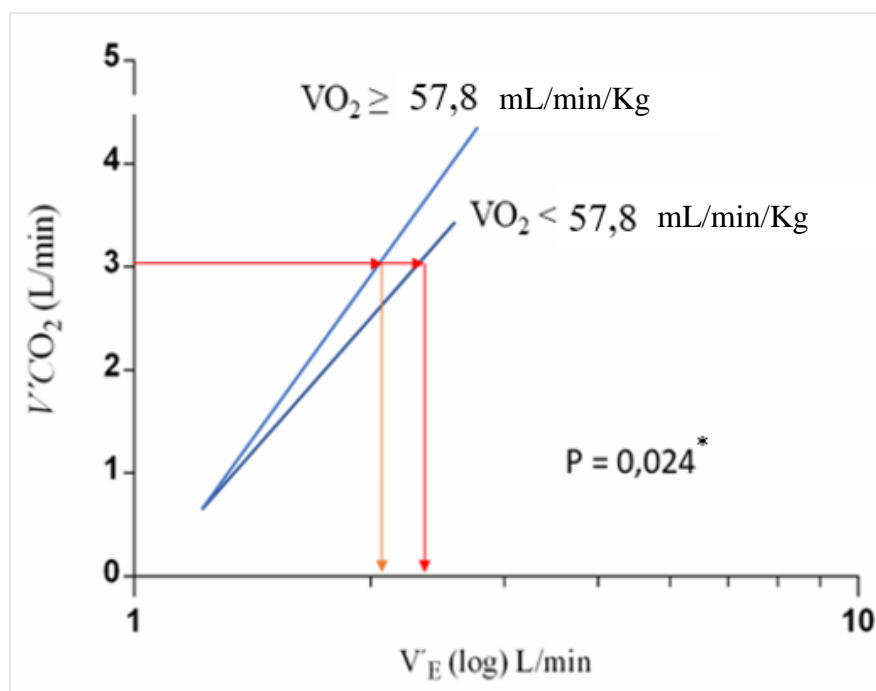
Valores descritos em média ± DP, desvio padrão. *Diferença significativa entre grupos ($p < 0,05$); $V'O_2$, consumo de O₂; PuO_2 , pulso de O₂; IMC, índice de massa corpórea; $\eta V'E$, eficiência ventilatória novo método; Slope T, $V'E/V'CO_2$ slope total; Slope 1, $V'E/V'CO_2$ slope até PCR; Nadir, $V'E/V'CO_2$ nadir; CO₂ACR, taxa real constante de remoção de CO₂.

- *Eficiência Ventilatória e $V'O_2$ max*

A análise estatística revelou que não houve significância ($p > 0,05$) nos resultados referentes aos índices de eficiência ventilatória $V'E/V'CO_2$ nadir ($26,8 \pm 3,3$; $27,9 \pm 3,3$) e $\eta V'E$ ($21,7 \pm 6,5$; $24,2 \pm 7,4$) quando relacionados aos grupos de menor e maior valor de $V'O_2$. Quanto aos índices de eficiência ventilatória $V'E/V'CO_2$ slope total ($32,6 \pm 4,4$; $36,2 \pm 5,5$), CO₂-ACR ($6,6 \pm 1,8$; $8,0 \pm 2,5$), $V'E/V'CO_2$ slope 1 ($28,4 \pm 5,3$; $32,3 \pm 6,7$), houve diferença significativa ($p < 0,05$) em seus valores de acordo com os estratos de $V'O_2$.

O grupo de maior valor de $V'O_2$ (mais jovem e com IMC menor) obteve taxas maiores de remoção de CO₂ de acordo com índice CO₂-ACR (Figura 4), e valores elevados de $V'E/V'CO_2$ slope total e $V'E/V'CO_2$ slope 1.

FIGURA 4 – Representação Gráfica do Índice de Taxas Reais de Remoção de CO₂ (CO₂-ACR)



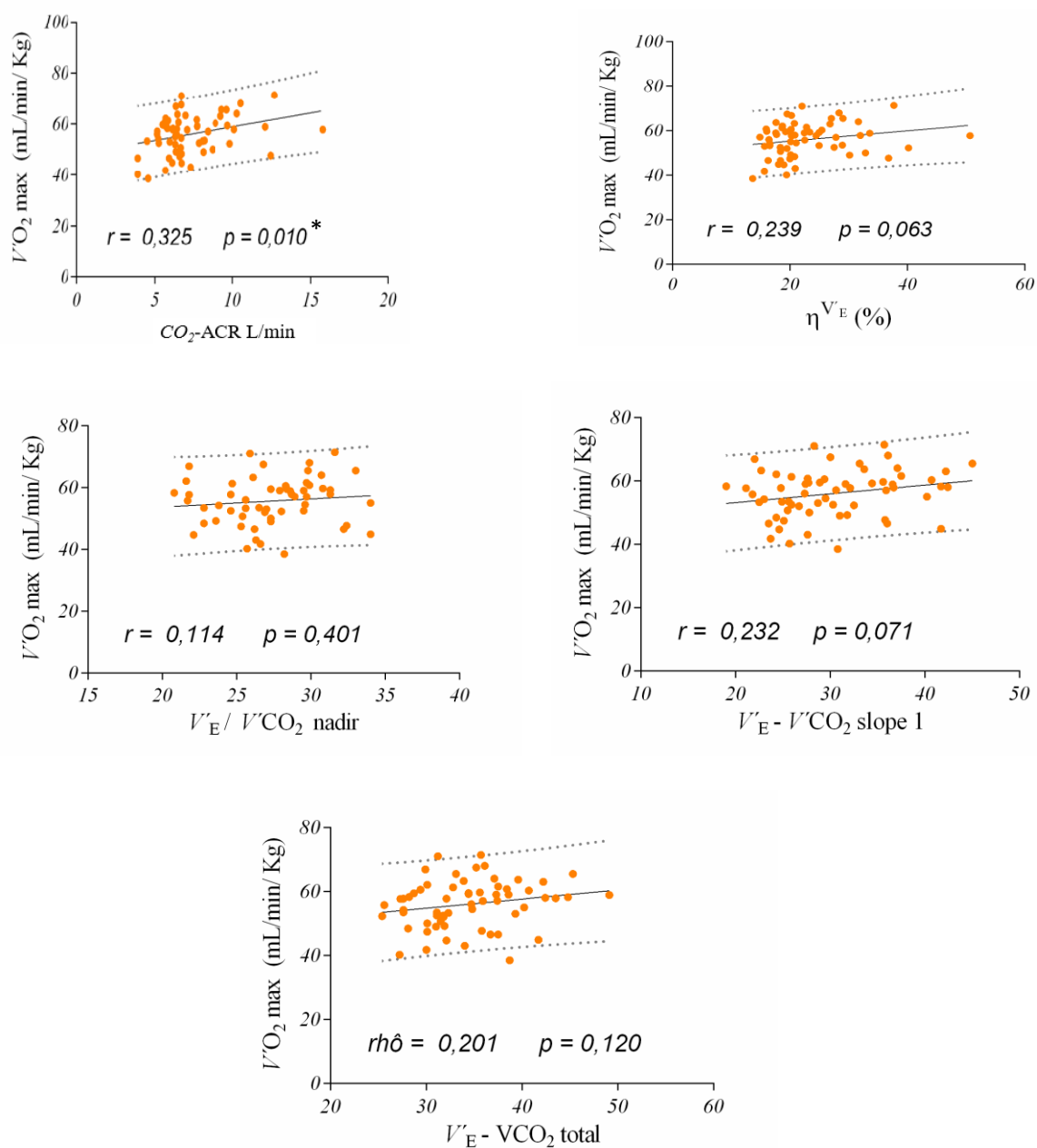
FONTE: A autora, 2022. Representação Gráfica do Índice de Taxas Reais de Remoção de CO₂ (CO₂-ACR): para a de extração do mesmo valor em litros de CO₂, o grupo de maior $V'O_2$ ($\geq 57,8$ ml/min/Kg) atingiu níveis menores de $V'E$ em comparação ao grupo de menor $V'O_2$ ($< 57,8$ ml/min/Kg). *Diferença significativa entre os grupos ($p=0,024$).

- *Eficiência Ventilatória e Pulso de O₂*

A análise estatística revelou que não houve significância ($p > 0,05$) nos resultados referentes aos índices de eficiência ventilatória $V'E/V'CO_2$ slope 1 ($30,1 \pm 5,5$; $30,6 \pm 7,3$), $V'E/V'CO_2$ slope total ($34,3 \pm 4,4$; $34,4 \pm 6,1$) e $V'E/V'CO_2$ nadir ($27,7 \pm 2,9$; $26,8 \pm 3,6$) quando relacionados aos grupos de menor e maior valor PuO_2/ASC . No que se refere ao índice de eficiência ventilatória CO₂-ACR ($6,6 \pm 1,9$; $8,0 \pm 2,4$) e $\eta V'E$ ($20,5 \pm 5,4$; $25,2 \pm 7,7$) houve diferença significativa ($p < 0,05$) em seus valores de acordo com os estratos de PuO_2/ASC (Tabela 2).

Dados expostos na Figura 5 mostram que, exceto pela significativa, porém fraca correlação de CO_2 -ACR $r = 0,325$; $p=0,010$, não houve correlação dos demais índices de eficiência ventilatória e $V'O_2$ max: $\eta V'E$ $r = 0,239$, $p=NS$; $V'E/V'CO_2$ nadir $r = 0,114$, $p=NS$; $V'E/V'CO_2$ slope 1 $r = 0,232$, $p=NS$; $V'E/V'CO_2$ slope total $rhô = 0,201$, $p=NS$.

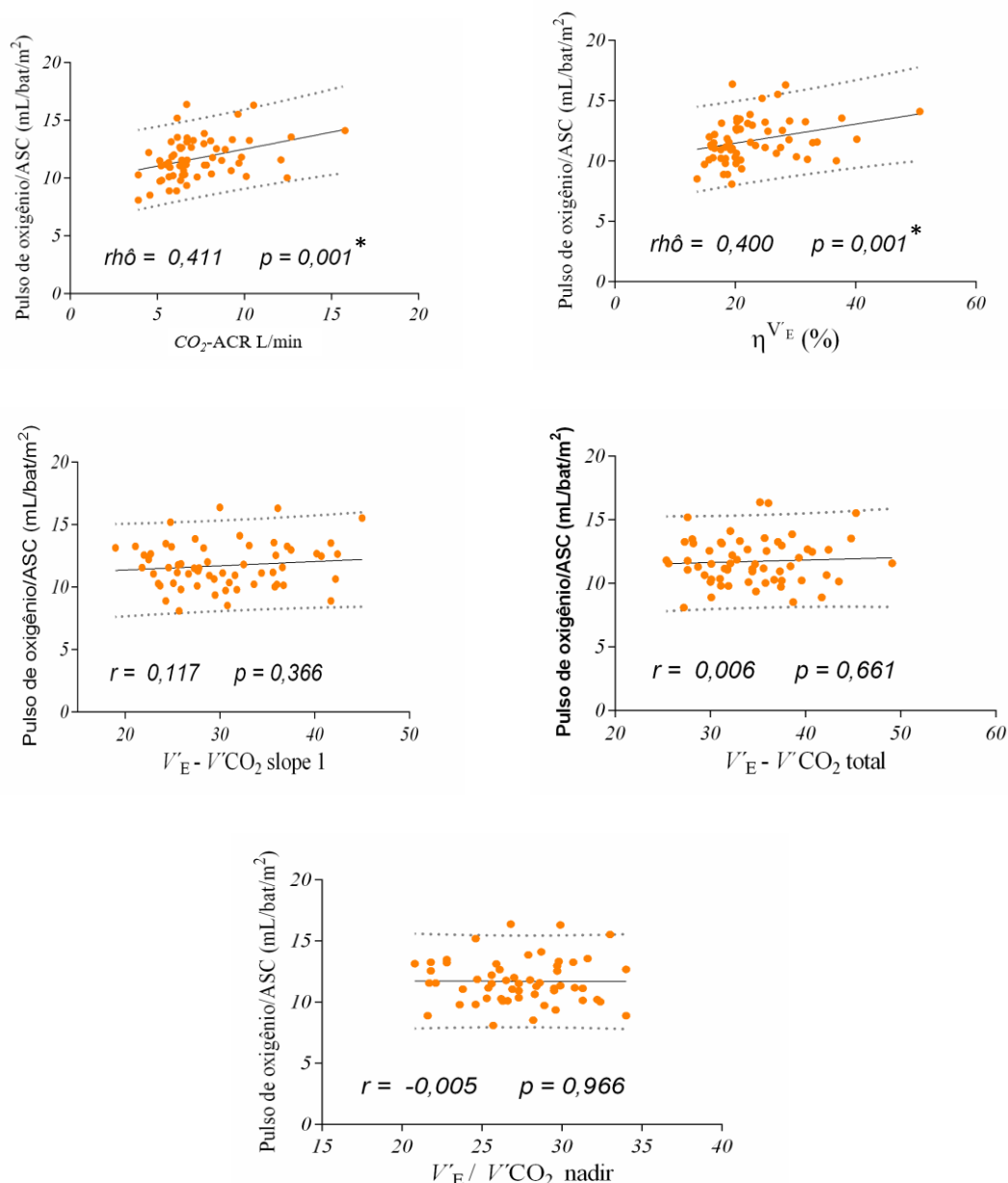
FIGURA 5 - Demonstração Gráfica das Correlações Entre $V'O_2$ (mL/min/Kg) e CO_2 -ACR, $V'E/V'CO_2$ slope total, $V'E/V'CO_2$ slope 1, $V'E/V'CO_2$ nadir e $\eta V'E$



FONTE: A autora, 2022. O valor de p é aquele do teste de correlação de Pearson ou Spearman. O r corresponde ao coeficiente de correlação linear de Pearson e o $rhô$ ao coeficiente de correlação linear de Spearman. A linha central representa a regressão linear, as pontilhadas, o intervalo de confiança. *Correlação significativa.

Dados expostos na Figura 6 se referem à correlação entre as variáveis de eficiência ventilatória e PuO_2 , apresentando significantes e moderadas correlações entre $\text{CO}_2\text{-ACR}$ e PuO_2/ASC $\text{rhô} = 0,411$, $p = 0,001$ e ηV_E e PuO_2/ASC $\text{rhô} = 0,400$, $p = 0,001$. Não houve correlação dos outros índices de eficiência ventilatória e PuO_2 : $V'_E/V'\text{CO}_2 \text{ slope } 1$ $r = 0,117$, $p = \text{NS}$; $V'_E/V'\text{CO}_2 \text{ slope total}$ $r = 0,006$, $p = \text{NS}$ e $V'_E/V'\text{CO}_2 \text{ nadir}$ $r = -0,005$, $p = \text{NS}$.

FIGURA 6 - Demonstração Gráfica das Correlações Entre PuO_2/ASC e $\text{CO}_2\text{-ACR}$, $V'_E/V'\text{CO}_2 \text{ slope total}$, $V'_E/V'\text{CO}_2 \text{ slope } 1$, $V'_E/V'\text{CO}_2 \text{ nadir}$ e ηV_E .

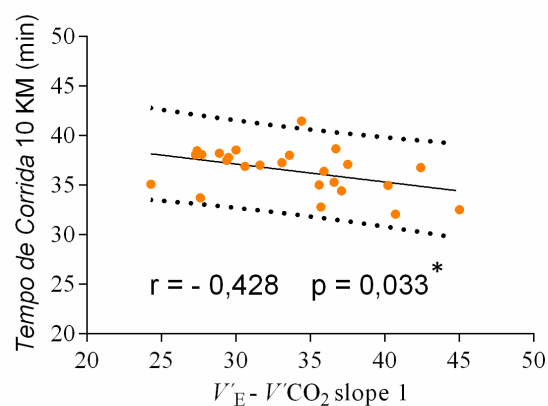


FONTE: A autora, 2022. O valor de p é aquele do teste de correlação de Pearson ou Spearman. O r corresponde ao coeficiente de correlação linear de Pearson e o rhô ao coeficiente de correlação linear de Spearman. A linha central representa a regressão linear, as pontilhadas, o intervalo de confiança. *Correlação significativa.

- *Eficiência Ventilatória e Tempo de Corrida*

A Figura 7 ilustra a correlação negativa e significativa entre tempo de corrida e $V'E/V'CO_2 \text{ slope } 1$ ($r = -0,428$, $p = 0,033$), que significa que quanto mais alto o valor de $V'E/V'CO_2 \text{ slope } 1$ e, portanto, pior a eficiência ventilatória, menor foi o tempo de corrida. Não houve correlação dos demais índices de eficiência ventilatória e tempo de corrida.

FIGURA 7 - Demonstração Gráfica das Correlações entre $V'E/V'CO_2 \text{ slope } 1$ e Tempo de Corrida



FONTE: A autora, 2022. O valor de p é aquele do teste de correlação de Pearson. O r corresponde ao coeficiente de correlação linear de Pearson. A linha central representa a regressão linear, as pontilhadas, o intervalo de confiança. *Correlação significativa.

7. DISCUSSÃO

Até onde sabemos, esse foi o primeiro estudo a analisar a relação dos novos métodos de eficiência ventilatória ($\eta V'E$ e $CO_2\text{-ACR}$) com respostas cardiometabólicas provenientes do TCPE, como $V'O_2$ e PuO_2 , além de também relacioná-las aos métodos tradicionais como $V'E/V'CO_2 \text{ slope}$ e $V'E/V'CO_2 \text{ nadir}$, já descritos na Literatura. Levantamos a possibilidade de existir uma associação mais forte entre parâmetros cardiometabólicos derivados do TECP com as novas variáveis de eficiência ventilatória, comparados com as variáveis convencionais, o que foi consistente com nosso principal achado de que, pela primeira vez, um índice de eficiência ventilatória - taxa real de remoção de CO_2 ($CO_2\text{-ACR}$) - mostrou uma correlação tanto com $V'O_2$ quanto com PuO_2 , com diferença significativa entre os grupos estratificados de acordo com os valores de corte de $57,8\text{ml/min/Kg}$ e $11,5\text{ml/bpm/m}^2$ respectivamente, indicando uma sensibilidade maior da variável na detecção da real eficiência ventilatória.

A eficiência ventilatória tem sido largamente estudada em indivíduos que apresentam alterações cardiovasculares e respiratórias, porém sua importância no desempenho esportivo permanece incerta, pois a hipótese de que uma maior eficiência de eliminação de CO_2 durante o exercício permite um melhor desempenho do atleta, relacionado a um maior $\dot{V}'\text{O}_2$, não foi confirmada na Literatura (SALAZAR-MARTÍNEZ et al., 2018), além de valores elevados de $\dot{V}'\text{E}/\dot{V}'\text{CO}_2$ *slope* serem apresentados nessa população consequente ao excesso de ventilação, podendo inferir ineficiência ventilatória. **Nosso estudo mostrou diferença significativa no valor de CO_2 -ACR entre os grupos de diferentes estratos de $\dot{V}'\text{O}_2$ max, evidenciando uma taxa maior de remoção de CO_2 no grupo de maior $\dot{V}'\text{O}_2$, além de, pela primeira vez, ter havido evidência de um índice de eficiência ventilatória a se relacionar a esse parâmetro.** No entanto, o índice $\eta\dot{V}'\text{E}$ não expressou diferença significativa entre os grupos.

Em relação às outras variáveis analisadas, observamos diferenças significantes nos valores de eficiência ventilatória entre os grupos de menor e maior $\dot{V}'\text{O}_2$, para os índices $\dot{V}'\text{E}/\dot{V}'\text{CO}_2$ *slope* total ($32,6 \pm 4,4$ e $36,2 \pm 5,5$, $p=0,0006$) e para $\dot{V}'\text{E}/\dot{V}'\text{CO}_2$ *slope* 1 ($28,4 \pm 5,3$ e $32,3 \pm 6,7$, $p=0,013$); ao observarmos o grupo de maior $\dot{V}'\text{O}_2$, pudemos notar valores mais altos desses índices, que poderiam refletir ineficiência ventilatória nesse grupo se levarmos em consideração os níveis estabelecidos como referência de normalidade para a população em geral, o que corrobora com os achados na literatura de que a inclinação da relação $\dot{V}'\text{E}/\dot{V}'\text{CO}_2$ tem apresentado resultados compatíveis com excesso de ventilação, com valores elevados, acima dos normais. Uma explicação seria a de que em virtude da alta aptidão física, atletas podem sustentar um esforço bem além do limiar ventilatório 2 (após o aumento de $\dot{V}'\text{E}$ em relação a $\dot{V}'\text{CO}_2$) e apresentar uma maior capacidade na remoção de CO_2 através do aumento da $\dot{V}'\text{E}$. Assim, a elevação dos resultados de $\dot{V}'\text{E}/\dot{V}'\text{CO}_2$ durante o tempo de exercício ($\dot{V}'\text{E}/\dot{V}'\text{CO}_2$ total) pode induzir a fator de confusão a respeito da saúde do indivíduo (PETEK et al, 2022). A associação dos métodos $\dot{V}'\text{E}/\dot{V}'\text{CO}_2$ *slope* e CO_2 -ACR na interpretação da eficiência ventilatória mostra um campo promissor, e a verdadeira ineficiência ventilatória em atletas poderia ser estabelecida somente se o incremento de $\dot{V}'\text{E}/\dot{V}'\text{CO}_2$ *slope* fosse acompanhado de decréscimo de CO_2 -ACR denotando incompatibilidade da ventilação-perfusão.

Salvo pela correlação positiva e fraca com o índice CO_2 -ACR, não houve relação dos demais índices de eficiência ventilatória e $\dot{V}'\text{O}_2$. Dados de Salazar-Martínez et al (2018) revelaram que a performance de atletas de *endurance* de várias modalidades (corrida, ciclismo e triatlo), e de níveis profissional e amador não estava relacionada à eficiência ventilatória, e

que esse índice se comportou de maneira similar, independentemente do nível de condicionamento físico, idade, índice de massa corpórea e do ergômetro utilizado. Valores médios semelhantes de eficiência ventilatória ($V'E/V'CO_2$ slope) foram encontrados em ciclistas de classe mundial ao longo de três temporadas ($24,6 \pm 3,1$; $23,6 \pm 2,7$; $24,8 \pm 2,6$), o que sugere que esse índice mantém uma faixa constante, independente do esforço físico e adaptações de treinamento. Algumas possibilidades poderiam estar envolvidas em mudanças ao longo do tempo nesses atletas: alterações do espaço morto, mudanças na sensibilidade do corpo carotídeo e melhora na mecânica da musculatura respiratória. Porém, os achados corroboram para que esses fatores não estejam condicionados à eficiência ventilatória. Não houve relação de $V'E/V'CO_2$ slope e $V'O_2$ max (SALAZAR-MARTÍNEZ et al., 2016). Em ciclistas juvenis de elite, nenhuma relação foi encontrada entre $V'O_2$ max e $V'E/V'CO_2$ slope e OUES (*oxygen uptake efficiency slope/eficiência de absorção de O_2 slope*), sugerindo que se atletas têm uma eficiência ventilatória prejudicada não há prejuízo na sua habilidade em consumir O_2 . Além disso, ambos OUES e $V'E/V'CO_2$ slope não tiveram eficácia em quantificar o desempenho do sistema fisiológico que suporta a habilidade do atleta em apresentar um alto consumo de O_2 durante o exercício (BROWN et al., 2013). Os achados descritos corroboram com o nosso resultado para o novo índice $\eta V'E$, que é uma medida de eficiência ventilatória intrinsicamente ajustada para idade, estatura e sexo através do valor predito para ventilação voluntária máxima, apontando que não há associação entre $V'O_2$ max e eficiência ventilatória.

Em termos da relação das variáveis de eficiência ventilatória e PuO_2 , pudemos observar moderada correlação dos índices CO_2 -ACR ($\rho = 0,411$, $p=0,001$) e $\eta V'E$ ($\rho = 0,400$, $p = 0,001$), demonstrando maior potencial das variáveis em refletir sobre a) remoção real de CO_2 , condicionado indiretamente à medida de volume sistólico, imprescindível para melhores condições da relação Ventilação/Perfusão que acontece nos pulmões, com consequente melhora da troca gasosa (difusão do CO_2), essa muito mais dependente do volume sistólico (VS) que da FC como componentes do débito em atletas; b) que indivíduos com maior VS apresentam maior competência de condução do CO_2 da periferia para os pulmões.

As variáveis de eficiência ventilatória CO_2 -ACR e $\eta V'E$, apresentaram diferenças significantes em seus valores entre os grupos de indivíduos com $PuO_2/ASC \geq$ ou $< 11,5$ ml/bpm/m². Isso ilustra o importante conceito de que esses índices de eficiência ventilatória são diretamente relacionados à magnitude dos ajustes cardiovasculares, já que o PuO_2

($V'O_2/FC$) prevê uma estimativa do volume sistólico e a perfusão periférica em resposta ao exercício (MAZAHERI et al., 2021). Até onde sabemos, essa associação com a eficiência ventilatória ainda não havia sido demonstrada anteriormente na literatura.

Por fim, este estudo destacou a moderada associação da eficiência ventilatória com o desempenho avaliado no teste de corrida de 10Km. Constatamos que o tempo total de corrida de 10Km mostrou correlação negativa com $V'E/V'CO_2$ slope 1, ou seja, quanto menor o tempo de corrida maior o valor de *Slope* 1, indicando ineficiência ventilatória, o que seria contraditório. Esse dado, somado aos valores elevados de *Slope* encontrados no grupo de indivíduos com maior $V'O_2$, sugerem que os índices comumente utilizados para aferir a eficiência ventilatória **de forma isolada** não refletem a capacidade do indivíduo apresentar um melhor desempenho. Como já mencionado anteriormente, no caso do deslocamento para cima de $V'E/V'CO_2$ slope no grupo de participantes de maior $V'O_2$, ao avaliarmos o índice isoladamente poderíamos ter uma interpretação errônea do quadro do indivíduo, podendo não refletir um problema de saúde do atleta relacionado à ineficiência ventilatória, e, sim, representar uma maior capacidade na remoção de CO_2 através do aumento da $V'E$.

Algumas limitações do nosso trabalho foram: 1- Quanto ao tamanho da amostra, o que restringiu as possibilidades da estratificação por modalidade esportiva; 2- também o número reduzido de mulheres se constituiu numa restrição, não podendo inferir diferenças em relação ao sexo. Sugerimos, então, que novos estudos sejam realizados com aumento do tamanho da amostra para que os resultados sejam mais robustos, além da necessidade de avaliar e interpretar a associação dos métodos $V'E/V'CO_2$ slope e CO_2 -ACR.

8. CONCLUSÃO

Concluimos que as novas métricas de eficiência ventilatória mostraram, no geral, maior associação com as variáveis cardiometabólicas do teste de exercício cardiopulmonar em atletas. No entanto, o $\eta V'E$, que é uma medida de eficiência ventilatória intrinsecamente ajustada para idade, estatura e sexo através do valor predito para ventilação voluntária máxima, mostra que não há associação entre $V'O_2$ max e eficiência ventilatória. Houve moderada e negativa correlação entre o desempenho dos atletas na prova de corrida de 10Km e o índice de eficiência ventilatória *Slope* 1.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARENA, R. et al. The Minute Ventilation/Carbon Dioxide Production Slope is Prognostically Superior to the Oxygen Uptake Efficiency Slope. **Journal of Cardiac Failure**, v. 13, n. 6, p. 462–469, 2007.

BROWN, S. J. et al. Ventilatory efficiency in juvenile elite cyclists. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 16, n. 3, p. 266–270, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsams.2012.06.010>>.

BUONO, M. J.; MALY, R. Augmented Hyperventilation Via Normoxic Helium Breathing Does Not Prevent Exercise-Induced Hypoxemia. **Canadian Journal of Applied Physiology**, v. 21, n. 4, p. 264–270, 1996.

CAILLAUD, C. et al. Pulmonary gas exchange and breathing pattern during and after exercise in highly trained athletes. **European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology**, v. 67, n. 5, p. 431–437, 1993.

COLLINS, S. et al. Ventilatory efficiency in athletes, asthma and obesity. **European Respiratory Review**, v. 30, n. 161, 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1183/16000617.0206-2020>>.

COSTA, R. V. et al. Respostas Ventilatórias e do Pulso de Oxigênio ao Exercício Dinâmico: Correlação com a massa muscular esquelética em portadores de insuficiência cardíaca crônica avaliados pela ergoespirometria. **Revista da Sociedade de Cardiologia do Estado do Rio de Janeiro**, v. 18, n.4 March 2005, p. 283–287, 2005. Disponível em: <http://www.rbconline.org.br/wp-content/uploads/a2005_v18_n04_art01.pdf>.

DANCEY, C. P.; REIDY, JOHN. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. 3 ed. Porto Alegre, Artmed, 2006

DAVIS, J. A. et al. Test-retest reliability for two indices of ventilatory efficiency measured during cardiopulmonary exercise testing in healthy men and women. **Clinical Physiology and Functional Imaging**, v. 26, n. 3, p. 191–196, 2006.

DEL ROSSO, S. et al. 10 Km Performance Prediction By Metabolic and Mechanical Variables: Influence of Performance Level and Post-Submaximal Running Jump Potentiation. **Journal of Sports Sciences**, v. 39, n. 10, p. 1114–1126, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1860361>>.

DEMPSEY, J. A. et al. Consequences of exercise-induced respiratory muscle work. **Respiratory Physiology and Neurobiology**, v. 151, n. 2–3, p. 242–250, 2006.

DEMPSEY, J.A., Wagner P.D. Exercise-induced arterial hypoxemia. **Journal of Applied Physiology**, v. 87, n. 6, p. 1997–2006, 1999.

GUENETTE, J. A. et al. Respiratory mechanics during exercise in endurance-trained men and women. **Journal of Physiology**, v. 581, n. 3, p. 1309–1322, 2007.

GUYTON, A.; HALL, J. **Fisiologia Médica**. [s.l: s.n.]v. 37

JOHNSON, B. D.; SAUPE, K. W.; DEMPSEY, J. A. Mechanical constraints on exercise hyperpnea in endurance athletes. **Journal of Applied Physiology**, v. 73, n. 3, p. 874–886, 1992.

KELLOGG, R.H. Laws of physics pertaining to gas exchange. In: Fishman AP, Farhi LE, Tenney SM, et al., eds. **Handbook of Physiology, The Respiratory System, Gas Exchange**. Bethesda, MD, American Physiological Society, 1987; pp. 13–30.

LAKATOS, E M; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 8 ed. - São Paulo: Atlas, 2017.

MAZAHERI, R. et al. Cardiopulmonary exercise test parameters in athletic population: A review. **Journal of Clinical Medicine**, v. 10, n. 21, 2021.

MCARDLE, W.D., KATCH F.I., KATCH V.L. **Fisiologia do Exercício| :Nutrição, energia e desempenho humano**. 8 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019.

MEZZANI, A. Cardiopulmonary exercise testing: Basics of methodology and measurements. **Annals of the American Thoracic Society**, v. 14, p. S3–S11, 2017.

MULLER, P. T.; SARAIVA, E. F. Ventilatory inefficiency during graded exercise in COPD: A pragmatic approach. **Clinical Physiology and Functional Imaging**, v. 41, n. 1, p. 103–109, 2021.

NAYOR, M. et al. Clinical and Hemodynamic Associations and Prognostic Implications of Ventilatory Efficiency in Patients with Preserved Left Ventricular Systolic Function. **Circulation: Heart Failure**, n. May, 2020.

NEDER, J. A. et al. Exercise ventilatory inefficiency in mild to end-stage COPD. **European Respiratory Journal**, v. 45, n. 2, p. 377–387, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1183/09031936.00135514>>.

NEDER, J.; NERY, L. Teste de Exercício Cardiopulmonar. **Jornal de Pneumologia**, v. 28, n. 3, p. 166–206, 2002.

PARANHOS, R. et al. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson: o Retorno. **Leviathan| cadernos de pesquisa política**, n. 8, p. 66-95, 2014.

PETEK, B. J. et al. Normative cardiopulmonary exercise data for endurance athletes: The Cardiopulmonary Health and Endurance Exercise Registry (CHEER). **European Journal of Preventive Cardiology**, v. 29, n. 3, p. 536–544, 2022.

PETEK B.J. et al. Characterization of Ventilatory Efficiency During Cardiopulmonary Exercise Testing in Healthy Athletes. **European Journal of Preventive Cardiology**. Nov 02 2022;doi:10.1093/eurjpc/zwac255

PHILLIPS, D. B.; COLLINS, S.; STICKLAND, M. K. Measurement and Interpretation of Exercise Ventilatory Efficiency. **Frontiers in Physiology**, v. 11, n. June, 2020.

ROCHA, A. et al. Excess ventilation in chronic obstructive pulmonary disease-heart failure overlap implications for dyspnea and exercise intolerance. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine**, v. 196, n. 10, p. 1264–1274, 2017.

ROMER, L. M. et al. Effect of inspiratory muscle work on peripheral fatigue of locomotor muscles in healthy humans. **Journal of Physiology**, v. 571, n. 2, p. 425–439, 2006.

SALAZAR-MARTÍNEZ, E. et al. Ventilatory efficiency and breathing pattern in world-class cyclists: A three-year observational study. **Respiratory Physiology and Neurobiology**, v. 229, p. 17–23, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resp.2016.04.001>>.

SALAZAR-MARTÍNEZ, E. et al. Influence of inspiratory muscle training on ventilatory efficiency and cycling performance in normoxia and hypoxia. **Frontiers in Physiology**, v. 8, n. MAR, p. 1–11, 2017.

SALAZAR-MARTÍNEZ, E. et al. Ventilatory efficiency response is unaffected by fitness level, ergometer type, age or body mass index in male athletes. **Biology of Sport**, v. 35, n. 4, p. 393–398, 2018.

SUN, X. G. et al. Ventilatory efficiency during exercise in healthy subjects. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine**, v. 166, n. 11, p. 1443–1448, 2002.

TAYLOR, B. J.; ROMER, L. M. Effect of expiratory muscle fatigue on exercise tolerance and locomotor muscle fatigue in healthy humans. **Journal of Applied Physiology**, v. 104, n. 5, p. 1442–1451, 2008.

VIEIRA, SÔNIA. **Introdução Bioestatística**. 4 ed. - Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

WEST, J.B. **Fisiologia Respiratória: princípios básicos**. 9 ed . Porto Alegre: Artmed, 2013.

WHIPP, B. J.; WARD, S. A. Cardiopulmonary coupling during exercise. **Journal of Experimental Biology**, v. 100, p. 175–193, 1982.

