

Análise de desempenho de métodos de detecção do platô de $\dot{V}O_2$ em protocolo de rampa iniciando em repouso

João Paulo de Paiva Holz
Alessandro José Queiroz Sarnaglia (Orientador)

Resumo

O consumo máximo de oxigênio é um parâmetro muito importante na fisiologia do exercício, é muito útil para auxiliar a prescrição de exercícios, por exemplo. Entre os critérios para confirmação de que o consumo máximo foi atingido, destaca-se o platô do consumo de oxigênio, que é caracterizado pela incapacidade de se aumentar o consumo, mesmo com o aumento da carga. Existem diferentes critérios de detecção de platô considerados na literatura e, até hoje, não há consenso daquele mais apropriado ao protocolo de rampa. Esse problema pode levar a conclusões divergentes, mesmo em estudos que consideram populações com características similares. Este estudo investiga o desempenho de diferentes critérios de caracterização de platô do consumo de oxigênio via métodos de Monte Carlo associados a dados reais. O estudo foi capaz de apontar características dos métodos como significância e poder empíricos, além de vício e variabilidade das estimativas de início do platô. A aplicação ilustrou as diferenças encontradas para os métodos considerados.

1 Introdução

Consumo de Oxigênio ($\dot{V}O_2$) é o volume de Oxigênio consumido por tempo para produzir Adenosina Trifosfato, a fonte energética para atividades musculares. Nesse sentido, o $\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$ é definido como o máximo de $\dot{V}O_2$ que uma pessoa consegue alcançar e representa a capacidade integrada dos sistemas pulmonar, cardiovascular e muscular de captar, transportar e utilizar O_2 , respectivamente. Assim, conhecer o $\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$ é importante, pois é um indicador do nível de condicionamento cardiorespiratório do indivíduo.

Em protocolos de rampa partindo do repouso, a dinâmica do $\dot{V}O_2$ apresenta um comportamento complexo, composto de uma fase inicial exponencial em resposta ao incremento de carga inicial em forma de degrau (adaptação do organismo) e uma transição para uma fase linear em resposta ao subsequente incremento contínuo de carga. No entanto, em alguns casos, no final do exercício, pode ser observado a formação de um platô do $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2plat\acute{o}}$), indicando

a incapacidade do indivíduo em consumir mais oxigênio, mesmo com o aumento de carga. Como exemplos de dinâmicas possíveis para o $\dot{V}O_2$, veja as Figuras 1a e 1b a seguir.

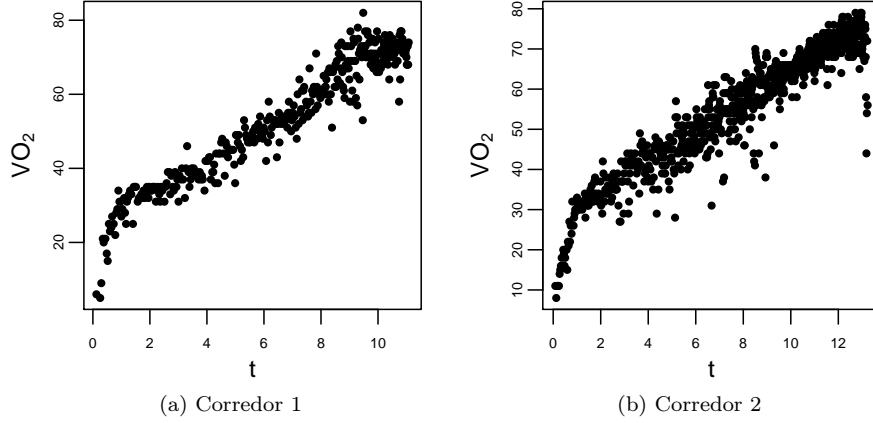


Figura 1: Dinâmica do $\dot{V}O_2$ para dois corredores sob o protocolo de rampa partindo do repouso.

Na Figura 1a é possível observar os estágios: inicial com comportamento exponencial, de adaptação ao exercício; e o de evolução linear do $\dot{V}O_2$. Adicionalmente, na Figura 1b, aparentemente há a ocorrência de um estágio final de estabilização do $\dot{V}O_2$, mesmo com incremento de carga, ou seja, um possível platô do $\dot{V}O_2$. Na literatura, o $\dot{V}O_{2\text{platô}}$ é amplamente utilizado para confirmar o alcance do $\dot{V}O_{2\text{máx}}$.

O conceito de $\dot{V}O_{2\text{platô}}$ foi introduzido por Hill and Lupton (1923) e, desde então inúmeros critérios para caracterizar a sua ocorrência têm sido considerados na literatura. Um dos mais citados foi o proposto por Taylor et al. (1955), originalmente desenvolvido para protocolos incrementais. Para o teste de rampa, esse critério foi adaptado por inúmeros autores, entre eles Astorino et al. (2000), enquanto outros utilizam critérios baseados em métodos estatísticos como análise de regressão.

Essa ampla quantidade de critérios diferentes pode gerar incidências de $\dot{V}O_{2\text{platô}}$ muito diferentes em estratos populacionais similares. Este trabalho utiliza métodos de Monte Carlo em conjunto com dados reais para investigar características como significância e poder dos diferentes critérios de determinação de platô do $\dot{V}O_2$ em dados sintéticos que reproduzam satisfatoriamente a dinâmica esperada do $\dot{V}O_2$. Espera-se que os resultados ajudem a promover uma uniformização metodológica no campo da Fisiologia do exercício, que necessite da identificação de $\dot{V}O_{2\text{platô}}$.

Em particular, foram considerados os critérios propostos por Astorino et al.

(2000), [Myers et al. \(1990\)](#) e [Patricio et al. \(2021\)](#). Os resultados do estudo de simulação mostram que o melhor método em termos de significância e poder empíricos é o proposto por [Patricio et al. \(2021\)](#), que também apresenta desempenho superior em termos de vício e variabilidade da estimativa de instante do platô. O estudo de aplicação mostrou a importância de se investigar o comportamento dos referidos métodos, revelando uma grande discordância entre eles em conjunto de dados reais.

O restante deste artigo é estruturado como se segue: na Seção 2 é apresentada uma breve descrição dos métodos de detecção de platô considerados; a Seção 3 apresenta e discute os resultados do experimento de Monte Carlo realizado; na Seção 4 são apresentados os resultados da análise dos dados reais; a Seção 4 conclui e fornece perspectivas futuras.

2 Metodologia

Os dados que motivaram este projeto são registrados respiração-a-respiração, não sendo, portanto, observações igualmente espaçadas no tempo. Assim, para um indivíduo, na i -ésima respiração, é registrado o par (t_i, V_i) , em que t_i e V_i representam, respectivamente, o instante e o $\dot{V}O_2$ no momento em que a i -ésima respiração foi registrada.

Neste estudo, será considerada uma das metodologias mais utilizadas para detecção de platô de $\dot{V}O_2$, cuja concepção se fundamenta na fisiologia do exercício. Para efeitos de comparação, também serão consideradas metodologias de identificação de platô que fazem uso de técnicas estatísticas, mesmo que adaptadas. Em particular, elas se baseiam em técnicas de regressão e regressão segmentada. Nas subseções a seguir, são apresentadas as metodologias de detecção de platô consideradas por este estudo.

2.1 Astorino

O critério de detecção de $\dot{V}O_{2\text{platô}}$ mais conhecido foi proposto por [Taylor et al. \(1955\)](#), originalmente desenvolvido para testes incrementais. Esse método foi adaptado para testes de rampa de diversas formas. Em particular, [Astorino et al. \(2000\)](#) sugerem, primeiramente, suavizar os dados por meio de médias móveis de 11 respirações, isto é, definir

$$\bar{V}_i = \frac{1}{11} \sum_{l=0}^{11} V_{i-l}, \quad i = 11, \dots, n. \quad (1)$$

A partir dos dados suavizados (Equação 1), [Astorino et al. \(2000\)](#) sugere janelas temporais de: 15, 30 e 60 segundos. Para cada janela é computada a

correspondente sequência de médias nas janelas temporais, isto é,

$$\begin{aligned}\bar{\bar{V}}_n &= \frac{1}{L_n} \sum_{l=0}^{L_n-1} \bar{V}_{n-l}, \\ \bar{\bar{V}}_{n-1} &= \frac{1}{L_{n-1}} \sum_{l=0}^{L_{n-1}-1} \bar{V}_{L_{n-1}-l}, \\ \bar{\bar{V}}_{n-2} &= \frac{1}{L_{n-2}} \sum_{l=0}^{L_{n-2}-1} \bar{V}_{L_{n-2}-l}, \\ &\vdots\end{aligned}$$

em que L_n é o número de respirações nos últimos T minutos, L_{n-1} é o número de respirações nos T minutos imediatamente anteriores, L_{n-2} é o número de respirações nos T minutos imediatamente anteriores, e assim por diante. A partir das médias temporais, é determinado o $\Delta\dot{V}O_2$ que é dado pela diferença entre o máximo dos \bar{V}_i e o ponto vizinho mais próximo. Se o valor de $\Delta\dot{V}O_2 < 2,1$ mL/min/kg, é declarada a ocorrência do platô do $\dot{V}O_2$. De acordo com Niemeyer et al. (2021), originalmente, esse limiar foi proposto por Taylor et al. (1955), que se basearam em testes de esteira com velocidade constante e sucessivos crescimentos diários de inclinação de 2.5%. Os autores encontraram que, entre os sucessivos incrementos de inclinação, o crescimento em $\dot{V}O_2$ apresentou amplitude de $\approx 2,2$ -5,9 mL/min/kg. De onde concluíram que, se o $\dot{V}O_2$ cresce menos que 2,1 mL/min/kg, existe uma pequena chance de erro em decidir que o $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ foi atingido. Embora o critério de Taylor et al. (1955) tenha sido desenvolvido para protocolos descontínuos, além de Astorino et al. (2000), esse limiar tem sido utilizado por diversos autores para determinar platô do $\dot{V}O_2$ em protocolos incrementais (Astorino, 2009; Beltrami et al., 2014; Thomson et al., 2015; Rivera-Brown and Frontera, 1998; Vella et al., 2006; Gordon et al., 2012). Neste estudo, com base em uma análise preliminar de desempenho, optou-se por se considerar apenas a janela de 15 minutos por ter apresentado melhores resultados, isto é, $T = 0,25$.

Quando o método de Astorino acusa a ocorrência de platô, o instante dessa ocorrência é estimado por $\bar{\bar{t}}_i$, em que $\bar{\bar{t}}_i$ é obtido do mesmo tratamento do prévio (média móvel e média em blocos) aplicado aos instantes t_j e i é o índice do máximo dos $\bar{\bar{V}}_i$.

2.2 Myers

De maneira parecida com aquela proposta por Astorino et al. (2000), a estratégia introduzida por Myers et al. (1990) é precedida por um tratamento prévio dos dados, que consiste em computar uma sequência de médias móveis dos pares

correspondentes a 8 respirações adjacentes, formalmente, obter a sequência

$$(\bar{t}_i, \bar{V}_i) = \frac{1}{8} \sum_{l=0}^7 (t_{i-l}, V_{i-l}), i = 8, \dots, n.$$

Após esse procedimento, no trecho final do protocolo (entre 3 a 6 minutos finais), são criadas sucessivas janelas de 30 observações suavizadas, fornecendo os segmentos $(\bar{t}_{i+1}, \bar{V}_{i+1}), \dots, (\bar{t}_{i+30}, \bar{V}_{i+30})$, em que o índice i percorre as respirações realizadas no período final do protocolo.

Em cada janela i , é ajustado o seguinte modelo de regressão linear simples:

$$\bar{V}_{i+j} = \alpha_i + \beta_i \bar{t}_{i+j} + e_j^{(i)}, j = 1, 2, \dots, 30, \quad (2)$$

em que α_i e β_i denotam respectivamente o intercepto e o slope para a i -ésima janela e, no caso de um modelo gaussiano, assume-se $e_j^{(i)} \sim N(0, \sigma_i^2)$.

O modelo de regressão linear simples gaussiano (Equação 2) exige: relação linear entre as variáveis; independência entre os pontos amostrais; homocedasticidade (variância constante); e a normalidade dos erros. Sob essas suposições, os parâmetros α_i , β_i e σ_i^2 podem ser estimados via máxima verossimilhança, por exemplo. Métodos de estimação para regressão linear são bem documentados na literatura (Yan and Su, 2009, por exemplo) e não serão discutidos aqui.

Para cada ajuste, é produzida uma, estimativa, $\hat{\beta}_i$, que é reportada em conjunto com o p -valor do teste $H_0 : \beta_i \leq 0 \times H_1 : \beta_i > 0$, associado à estimativa $\hat{\beta}_i$.

A não rejeição de H_0 indicaria o alcance de um possível platô, tendo em vista a ausência de efeito positivo do incremento de carga no aumento do consumo de oxigênio. Considerando que a análise de cada p -valor isoladamente é equivalente à realização de uma sequência de testes de hipóteses, a probabilidade de Erro Tipo 1 conjunta (declarar platô para dados sem platô) tende a exceder o nível de significância especificado. Veja a Figura 2 o comportamento dos p -valores individuais para dois conjuntos de dados sintéticos gerados com e sem platô. A rotina para a geração dos mesmos é descrita na Seção 3.

A Figura 2 mostra que avaliar os p -valores individuais pode levar a identificação de platôs submáximos (Figura 2a) ou de falsos platôs (Figura 2b). Para remediar esse problema, optou-se por avaliar janelas móveis de 40 p -valores e declarar a ocorrência de platô quando o percentual de p -valores não significantes da janela exceder o nível de significância pré-especificado.

No método de Myers, o instante do platô é estimado como \bar{t}_{i+1} , em que o bloco de p -valores de $\hat{\beta}_i, \hat{\beta}_{i+1}, \dots, \hat{\beta}_{i+39}$ passam no critério conjunto de especificação de platô descrito acima.

2.3 Patricio

Em particular, a dinâmica do $\dot{V}O_2$ (Figura 1), não permite supor relação linear entre a covariável e a variável resposta. O método apresentado na seção anterior tenta remediar esse problema por meio da criação de janelas e do uso de regressão

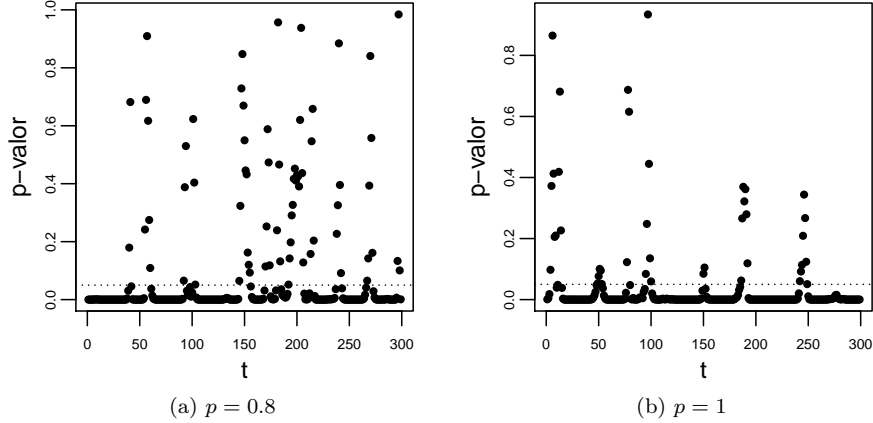


Figura 2: p -valores das janelas móveis de 30 observações dos últimos 6 minutos para dados sintéticos com e sem platô. A linha horizontal pontilhada corresponde ao nível de significância de 5%.

linear “móvel”. Outra alternativa proposta [Patricio et al. \(2021\)](#) consiste de utilizar regressão segmentada para aproximar a dinâmica não linear do $\dot{V}O_2$. O modelo de regressão segmentada é obtido quando há um comportamento linear por partes, isto é, quando o valor esperado $\mu_i = E(V_i|t_i)$ é composto por segmentos de retas com diferentes interceptos e slopes, dependendo do valor da variável explicativa t_i , em que os segmentos são contínuos nos pontos de mudança.

Formalmente, no modelo de regressão linear segmentada simples, é assumido que

$$\mu_i = \alpha + \beta_0 t_i + \beta_1 (t_i > \psi_1)_+ + \cdots + \beta_k (t_i > \psi_k)_+,$$

onde $(t)_+ = t \cdot I(t > 0)$, isto é, $(t)_+ = t$, se $t > 0$, e $(t)_+ = 0$, se $t \leq 0$. De modo que as observações satisfazem

$$\begin{aligned} V_i &= \alpha + \beta_0 t_i + \beta_1 (t_i > \psi_1)_+ + \cdots + \beta_k (t_i > \psi_k)_+ + e_i, \\ &= \alpha + \beta_0 t_i + \sum_{j=1}^k \beta_j (t_i > \psi_j)_+ + e_i, \end{aligned} \quad (3)$$

para $i = 1, \dots, n$, em que k é o número de pontos de mudança (a relação possui $k + 1$ segmentos), ψ_j é o ponto de mudança entre o segmento j e $j + 1$, α é o intercepto, β_0 é o slope do primeiro segmento e β_j denota a diferença entre os slopes dos segmentos $j + 1$ e j , $j = 1, \dots, k$, e, no caso gaussiano, $e_i \sim N(0, \sigma^2)$.

A estimação dos parâmetros do modelo segmentado apresenta certos desafios, tendo em vista que a log-verossimilhança só é diferenciável por partes ([Feder, 1975](#)). Além disso, os pontos de mudança são desconhecidos, o que torna a

estimação em um problema de otimização não linear, podendo ser instável computacionalmente. Motivado por esses problemas, [Muggeo \(2003\)](#) propõe um método de estimação recursivo.

O método sugerido em [Muggeo \(2003\)](#) se baseia na expansão de Taylor de primeira ordem da função $g(\psi) = (t > \psi)_+$ em torno de um valor inicial $\psi^{(0)}$. Essa expansão é dada por

$$g(\psi) \approx g(\psi^{(0)}) + g'(\psi^{(0)})(\psi - \psi^{(0)}).$$

Notando que $g'(\psi) = -I(t > \psi)$, a equação acima resulta em

$$(t > \psi)_+ \approx (t > \psi^{(0)})_+ - (\psi - \psi^{(0)})I(t > \psi^{(0)}).$$

Assim, o modelo segmentado pode ser aproximado por

$$V_i \approx \alpha + \beta_0 t_i + \sum_{j=1}^k \beta_j U_{ij} + \sum_{j=1}^k \gamma_j W_{ij} + e_i, \quad (4)$$

em que as covariáveis

$$U_{ij} = (t_i > \psi_j^{(0)})_+ \text{ e } W_{ij} = -I(t_i > \psi_j^{(0)}),$$

e o parâmetro

$$\gamma_j = \beta_j(\psi_i - \psi_j^{(0)}). \quad (5)$$

A Equação 4 define um modelo de regressão linear múltipla que aproxima o modelo segmentado (Equação 3), mas que pode ser estimado via métodos usuais (máxima verossimilhança, por exemplo). Obtidas as estimativas do modelo aproximado, podemos utilizar a Equação 5 para atualizar a estimativa de ψ , por meio de

$$\psi_j^{(1)} = \psi_j^{(0)} + \frac{\gamma_j}{\beta_j}, j = 1, \dots, k.$$

O processo é repetido iterativamente, até ser alcançado algum critério de convergência

[Patricio et al. \(2021\)](#) introduzem um critério de identificação de platô inovador, baseado em regressão segmentada (Equação 3). O método consiste em aproximar a dinâmica verdadeira do $\dot{V}O_2$, ajustando aos dados um modelo com três segmentos (dois pontos de quebra), com slope do último segmento fixado em zero (o que corresponderia à ocorrência de platô).

Mais precisamente, é considerado o modelo

$$V_i = \alpha + \beta t_i + \beta_i(t_i - \psi_1) - (\beta_0 + \beta_1)(t_i - \psi_2) + e_i, \quad (6)$$

em que é imposta a restrição $\beta_2 = -\beta_0 + \beta_1$. As estimativas $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$ e $\hat{\psi}_1$ fornecidas pelo ajuste são utilizadas para gerar amostras bootstrap do seguinte modelo com apenas os dois primeiros segmentos (correspondendo a dados sem platô):

$$V_i^b = \hat{\alpha} + \hat{\beta}_0 t_i + \hat{\beta}_1(t_i + \hat{\psi}_i)_+ + e_i^b.$$

As amostras bootstrap são ajustadas pelo modelo na Equação 6, produzindo estimativas $\hat{\psi}_2^b$ do modelo com platô a dados sem platô. O p -valor do teste é obtido como a probabilidade da distribuição bootstrap de $\hat{\psi}_2^b$ produzir estimativas maiores do que a estimativa obtida dos dados originais, $\hat{\psi}_2$. Nesse caso, o valor de $\hat{\psi}_2$ correspondente à estimativa para o instante de início de platô.

3 Simulação

Os métodos descritos acima serão avaliados em dados sintéticos gerados via Monte Carlo. O cenário foi desenhado para replicar a aplicação realizada por [Patricio et al. \(2021\)](#). Foram gerados dados de um modelo segmentado com o platô (ψ_2) ocorrendo em $p \cdot \max(t)$, com $p = 1, 0.95, 0.90, 0.85, 0.80$. Note que, $p = 1$ representa a ausência de platô. Embora essa simulação não reflita a dinâmica esperada do $\dot{V}O_2$, ela descreve o modelo considerado por [Patricio et al. \(2021\)](#) para descrever a dinâmica do $\dot{V}O_2$. Os demais parâmetros do modelo segmentado simulado são $\alpha = 11$, $\beta_0 = 25$, $\beta_1 = -21$, $\beta_2 = -4$ e $\sigma^2 = 11$. A Figura 3 apresenta um conjunto de dados típicos gerados nessa simulação.

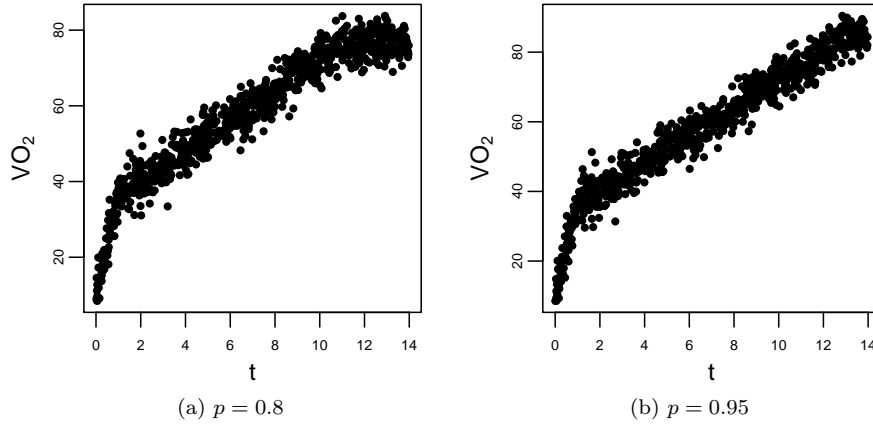


Figura 3: Dados sintéticos gerados por um modelo segmentado com dois pontos de mudança.

3.1 Proporção de Erro Tipo 1 e poder empíricos

Em todos os cenários considerados, foram computadas as frequências de detecção de platô. Essa quantidade permite acessar a proporção de Erro Tipo 1 (quando $p = 1$) e o poder empírico (se $p < 1$). É importante ressaltar que o método de Astorino não permite estabelecer um nível de significância pré-especificado. O método de Myers permite estabelecer o nível de significância do

teste para o slope de cada regressão linear móvel levando em consideração que nessa estratégia são realizados diversos testes de hipóteses, é possível estabelecer só indiretamente a significância do método de detecção. Na Seção 2.2 foi proposto um método de janela pare tentar remediar esse problema, por outro lado, o método de Patrício permite a especificação direta para o nível de significância para a declaração de platô. Dessa forma, quando possível foi fixado um nível de significância de 5% para o respectivo método de identificação de Platô.

A Tabela 1 apresenta o percentual de detecção platô para os métodos de Astorino, Myers e Patrício, nos diferentes cenários considerados. A Figura 4 ilustra as frequências de detecções de platô apresentados na Tabela 1 para $n = 400$ e 800 .

Tabela 1: Percentual de indicação de platô (A = Astorino, M = Myers e P = Patrício).

$p \max(t)$	$n = 400$			$n = 600$			$n = 800$		
	A	M	P	A	M	P	A	M	P
1.00	0.130	0.000	0.041	0.148	0.035	0.022	0.146	0.324	0.014
0.95	0.507	0.000	0.428	0.596	0.104	0.535	0.620	0.559	0.533
0.90	0.760	0.120	0.995	0.809	0.747	0.999	0.826	0.978	1.000
0.85	0.830	0.682	1.000	0.888	0.984	1.000	0.873	1.000	1.000
0.80	0.898	0.933	1.000	0.896	1.000	1.000	0.891	1.000	1.000

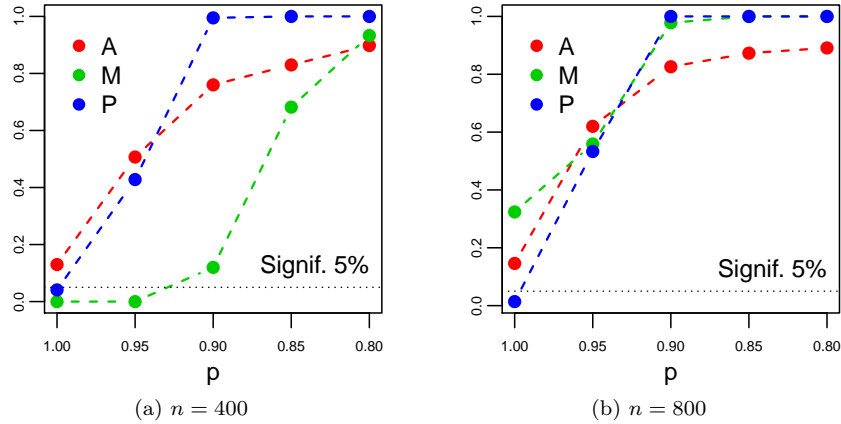


Figura 4: Probabilidade erro tipo 1 e Poder empíricos dos métodos de Astorino (A), Myers (M) e Patrício (P)

Como mencionado anteriormente, a primeira linha da Tabela 1 (com $p = 1$) se refere a um cenário sem platô. Nesse cenário, para todos tamanhos amostrais,

verifica-se que o método de Astorino apresenta proporção de detecção (Errônea) em torno de 14%. Como mencionado anteriormente, esse método não permite a fixação de um nível de significância, o que indica que, ao usá-lo, o usuário se sujeita a uma alta taxa de detecção errônea. Esse comportamento não parece ser alterado com o aumento do tamanho amostral. Para os métodos de Myers e Patricio, fixou-se o nível de significância em 5%. Para o menor tamanho amostral considerado, o método de Myers se mostra bastante conservador, apresentando proporção de detecção (errônea) de platô de 0%, isso se inverte com o aumento do tamanho amostral com proporção errônea 32.4 %, muito acima do nível de 5% pré-estabelecido. Por outro lado, o método de Patricio atende o nível de significância especificado para todos tamanhos amostrais.

Os valores de $p < 1$ (linhas 2-5) representam cenários com platô e, portanto, os valores apresentados correspondem às proporções de detecção correta de platôs. Essas proporções de detecção correta equivalem ao poder do teste. A Figura 4 ilustra o poder dos três métodos para $n = 400$ e 800 .

Para amostras pequenas, é evidente que em platôs pouco pronunciados ($p = 0.95$), os métodos de Astorino e Patricio apresentam desempenho similares. No entanto, para platôs de evidência moderada à forte ($p \leq 0.9$), a superioridade do método de Patricio é evidente, apresentando detecção de quase 100% dos platôs. Para $n = 400$, o conservadorismo apresentado pelo método de Myers se reflete em seu baixo poder, apresentando desempenho similar aos outros métodos apenas na presença de forte evidência de platô ($p = 0.8$). Em grandes tamanhos amostrais ($n = 800$), os métodos de Myers e Patricio apresentam poder similares, no entanto, como mencionado anteriormente, nesse caso, o primeiro excede em muito o nível de significância quando $p = 1$. Por sua vez, o desempenho do método de Astorino não aparenta apresentar ganhos com o aumento do tamanho amostral.

Dessa forma, em termos de detecção de platô, o método de Patricio se destaca tanto na proporção de falsos positivos (detectar erroneamente um platô), quanto no poder do teste.

3.2 Estimação do instante do Platô

A Tabela 2 apresenta a média das estimativas dos instantes de ocorrência do platô para cada um dos métodos considerados. Ressalta-se que o cenário $p = 1$ não é apresentado por representar a ausência de platô. Além disso, os valores médios só foram computados para estimativas produzidas por conjuntos de dados classificados como platô pelo respectivo método.

Os resultados da Tabela 2 mostram que, para $n = 400$, os métodos de Astorino e Myers produzem estimativas com vício positivo, isto é, tendem a apontar que o platô ocorre em instante posterior ao momento em que o platô realmente ocorre. É notável que o método de Myers não produziu nenhuma estimativa no cenário em que o platô ocorre próximo de $\max(t)$, indicando a sua instabilidade em pequenas amostras, para platôs próximos de fronteira do espaço paramétrico. Por outro lado, o método de Patricio apresenta vício consideravelmente inferior àqueles dos outros métodos. O método de Astorino não parece ser afetado pelo

Tabela 2: Posições estimadas para o platô (A = Astorino, M = Myers e P = Patrício) para amostras que tiveram platô identificado pelo respectivo método.

$p \max(t)$	$n = 400$			$n = 600$			$n = 800$		
	A	M	P	A	M	P	A	M	P
11.2	12.603	13.073	11.182	12.593	12.361	11.190	12.558	11.557	11.196
11.9	12.963	13.573	11.873	12.898	13.012	11.878	12.924	12.056	11.890
12.6	13.279	13.833	12.568	13.270	13.507	12.585	13.263	12.561	12.586
13.3	13.576	–	13.113	13.579	12.851	13.174	13.572	12.271	13.190

aumento do tamanho amostral, enquanto os métodos de Myers e Patrício, em geral, apresentando redução do vício. A superioridade do método de Patrício em termos de vício fica evidente pelos resultados da Tabela 2.

A seguir são analisados outros aspectos da distribuição empírica do estimador do instante de ocorrência do platô para cada um dos métodos considerados.

3.2.1 Astorino

Como mencionado anteriormente, o método de Astorino é precedido por uma etapa de suavização por médias móveis e posterior cálculo de médias de 15 segundos. A Figura 5 apresenta o resultado desse tratamento prévio empregado aos dados sintéticos mostrados anteriormente na Figura 3.

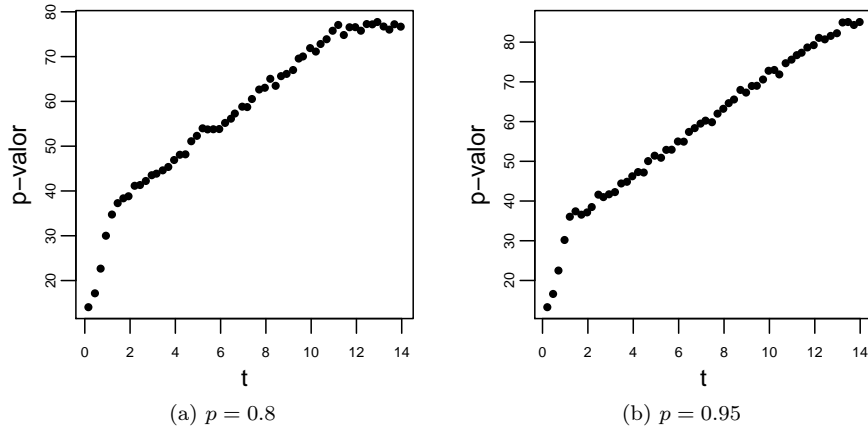


Figura 5: Tratamento prévio empregado como etapa preliminar do método de Astorino aos dados da Figura 3.

A Figura 5a mostra que o tratamento prévio pode ser capaz de evidenciar com mais clareza o platô dos dados. No entanto, esse tratamento pode ter o efeito de “atrasar” a ocorrência do platô (Figura 5b). Isso explica o vício positivo apresentado por este método na subseção anterior.

A Figura 6 apresenta as densidades empíricas das estimativas dos instantes de platô para os diferentes valores de p : $p = 0.8$ (azul); $p = 0.85$ (vermelho); $p = 0.9$ (verde); $p = 0.95$ (preto). A Figura 6 só apresenta os casos com $n = 400$ e 800, sendo o caso intermediário ($n = 600$) omitido.

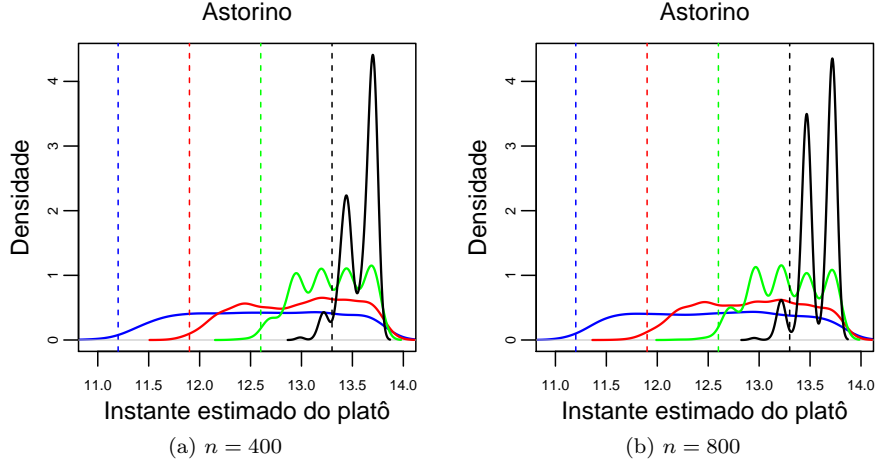


Figura 6: Distribuição empírica dos instantes estimados do platô para $p = 0.8$ (azul), 0.85 (vermelho), 0.9 (verde) e 0.95 (preto) para $n = 400$ (esquerda) e 800 (direita).

A primeira característica que chama atenção na Figura 6, é o comportamento multimodal das distribuições empíricas, mais evidente para valores de p próximos de 1. Isso pode ser explicado pelo fato de, no procedimento de tratamento prévio, ser realizada a média de blocos de 15 segundos, provocando uma espécie de discretização temporal.

Outra característica marcante é o fato de a distribuição empírica permanecer praticamente inalterada com o aumento do tamanho amostral, o que sugere que o método de Astorino não é consistente.

3.2.2 Myers

Como mencionado anteriormente, o método de Myers é precedido por uma suavização dos dados por meio de médias móveis. A Figura 7 mostra a referida suavização aplicada aos dados mostrados anteriormente na Figura 3.

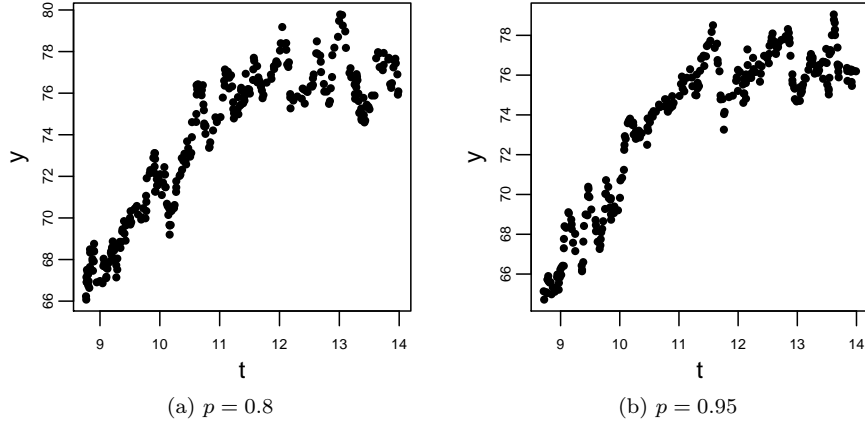


Figura 7: Suavização dos dados sintéticos apresentados na Figura 3 que precede o método de Myers

Como descrito anteriormente, o método de Myers aplica regressão linear à janelas móveis de 30 observações suavizadas em busca de ocorrência de slopes não significantes (indicativo de platô). A Figura 7 mostra que existem regiões de estabilização de $\dot{V}O_{2\text{platô}}$ suavizado que podem fazer com que, usar p -valores individuais, leve a declaração de falsos platôs ou platôs submáximos (antecipar o instante do platô). Esse fato justifica a análise coletiva dos p -valores descrita na Subseção 2.2.

A Figura 8 ilustra a mesma distribuição empírica da Figura 6 obtida para o método de Myers.

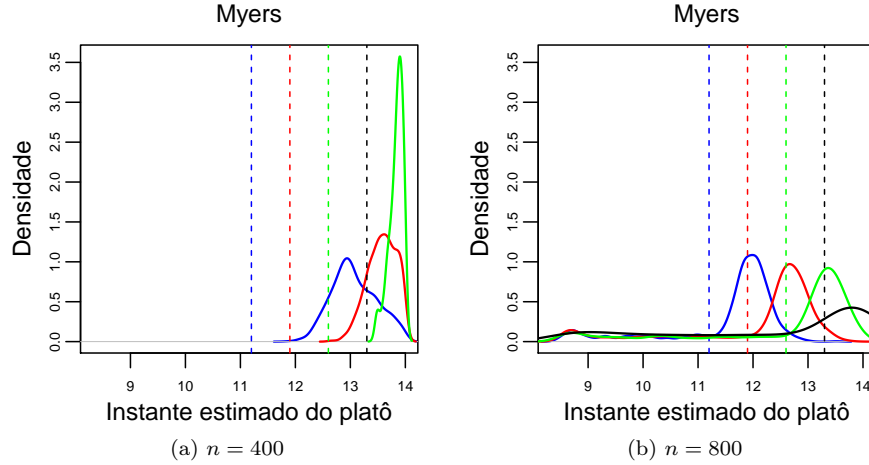


Figura 8: Distribuição empírica das estimativas dos instantes de platô fornecidas pelo método de Myers para $p = 0.8$ (azul); $p = 0.85$ (vermelho); $p = 0.9$ (verde); $p = 0.95$ (preto), para $n = 400$ (esquerda) e 800 (direita).

A Figura 8a mostra a ausência de estimativas para $p = 0.95$ e $n = 400$, devido à ausência de platô apontada pela estratégia de Myers para todas as amostras sintéticas desse cenário. No cenário com $n = 400$, nota-se um grande vício deste método, o que já foi mostrado na Tabela 1. O vício é reduzido com o aumento do tamanho amostral para $n = 800$ (Figura 8b). As estimativas aparentemente possuem uma distribuição simétrica, característica mais evidente para $n = 800$. Por fim, no cenário de $n = 800$, verifica-se que a variabilidade do estimador aumenta para valores de p próximos de 1.

3.2.3 Patricio

Uma das vantagens do método de Patricio é o fato de não haver necessidade de empregar tratamento prévio aos dados. Assim, esse método não está sujeito a escolhas subjetivas, como defasagem de médias-móveis ou tamanho de janelas. A Figura 9 ilustra a distribuição empírica das estimativas dos instantes de platô fornecidas pelo método de Patricio.

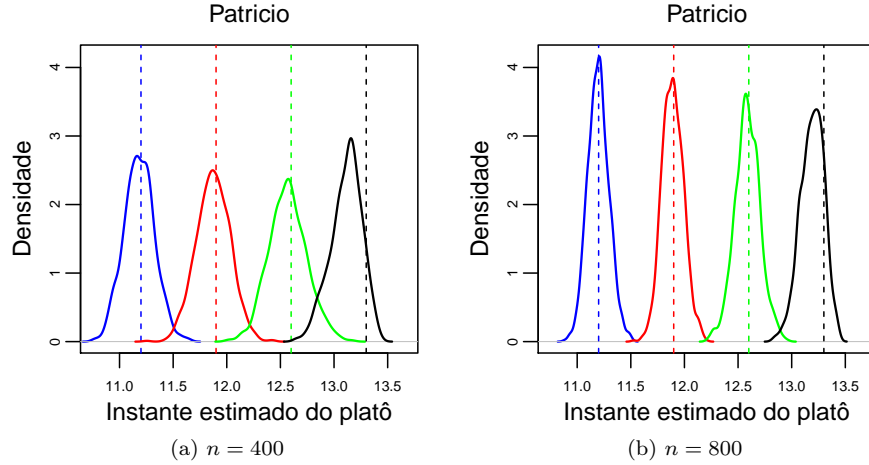


Figura 9: Distribuição empírica das estimativas dos instantes de platô fornecidas pelo método de Patricio para $p = 0.8$ (azul); $p = 0.85$ (vermelho); $p = 0.9$ (verde); $p = 0.95$ (preto), para $n = 400$ (esquerda) e 800 (direita).

Diferentemente, dos métodos de Astorino e Myers, observa-se que, em acordo com a Tabela 2, o método de Patricio apresenta baixo vício, sendo o pior dos casos observados para valores de p próximos de 1 ($p = 0.95$). Esse problema é atenuado com o aumento do tamanho amostral. Outra característica importante é a redução da variabilidade do estimador para amostras grandes. Os dois comportamentos do estimador, quando combinados, indicam a consistência fraca do método. Por fim, o formato simétrico da distribuição empírica se assemelha ao de uma distribuição normal, o que é indício de normalidade assintótica do estimador.

4 Aplicação

Nesta seção são analisados dados de $\dot{V}O_2$ de 36 indivíduos submetidos ao protocolo de rampa partindo do repouso. A Figura 1 na introdução apresentou os dados de dois indivíduos desse conjunto. O tamanho amostral médio apresentado pelos indivíduos foi de 408,97, com tempos médios de duração 11,31 minutos.

Para cada indivíduo, cada método foi utilizado para testar a ocorrência ou ausência de $\dot{V}O_{2\text{platô}}$. Para os indivíduos com platô detectado, o respectivo método foi utilizado para estimar o instante do platô. Os resultados da análise são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados do teste de Platô e seu início estimado para cada indivíduo seguindo os métodos de Astorino, Myers e Patricio.

Indivíduo	Duração	n	Astorino		Myers		Patricio	
			Platô	Posição	Platô	Posição	Platô	Posição
1	12.901	600	Sim	12.901	Não	–	Não	–
2	12.081	565	Sim	11.580	Sim	8.530	Sim	10.171
3	13.233	810	Sim	12.473	Sim	8.108	Sim	12.091
4	11.495	331	Sim	10.981	Não	–	Sim	10.246
5	10.160	390	Sim	10.160	Não	–	Sim	9.107
6	13.306	635	Sim	11.801	Sim	12.028	Sim	11.542
7	12.068	448	Sim	12.068	Não	–	Não	–
8	11.566	503	Não	–	Sim	10.305	Sim	9.962
9	12.908	604	Sim	12.908	Não	–	Não	–
10	11.158	326	Não	–	Não	–	Não	–
11	10.896	281	Sim	9.125	Sim	8.686	Sim	8.659
12	08.321	263	Sim	8.065	Não	–	Não	–
13	11.148	422	Sim	11.148	Não	–	Não	–
14	11.576	522	Sim	11.576	Sim	6.451	Não	–
15	09.825	419	Sim	9.825	Sim	6.446	Não	–
16	11.076	372	Sim	11.076	Sim	10.425	Sim	10.103
17	12.068	451	Sim	12.068	Não	–	Não	–
18	11.576	408	Sim	11.576	Sim	10.983	Sim	9.101
19	12.823	266	Sim	12.823	Não	–	Não	–
20	12.000	411	Sim	12.000	Não	–	Sim	10.910
21	11.075	420	Sim	10.566	Sim	9.970	Sim	9.445
22	08.988	378	Sim	8.988	Não	–	Sim	8.032
23	09.736	283	Sim	9.736	Não	–	Não	–
24	12.748	523	Sim	12.748	Sim	12.335	Não	–
25	11.575	424	Sim	11.575	Não	–	Não	–
26	10.738	386	Sim	10.738	Sim	8.143	Não	–
27	10.068	333	Sim	9.305	Sim	8.905	Sim	8.239
28	11.911	433	Sim	11.400	Não	–	Sim	10.444
29	11.241	209	Sim	11.241	Não	–	Não	–
30	10.755	253	Sim	10.755	Não	–	Não	–
31	09.406	368	Sim	9.406	Sim	8.193	Sim	7.859
32	10.663	319	Sim	10.405	Não	–	Não	–
33	11.406	361	Sim	11.406	Não	–	Sim	10.470
34	12.081	391	Sim	11.561	Sim	11.900	Sim	10.512
35	10.740	289	Sim	10.233	Não	–	Não	–
36	12.075	326	Sim	11.806	Não	–	Não	–

Da Tabela 3, se obtêm as proporções de indentificação de platô de: 94,4% (Astorino), 58,3% (Myers), 47,2% (Patricio). Note que a proporção de detecção é muito maior para o método de Astorino, o que pode ser explicado pela alta taxa de falsos positivos apresentada por este método no estudo de simulação, independente do tamanho amostral (Tabela 1). Em geral, o método de Astorino apontou instantes de platô muito próximos do final do exercício, o que pode ser consequência do “atraso” do platô discutido na Subseção 3.2.1. Por outro lado, mesmo adotando a estratégia de janela de p -valores, para alguns indivíduos, o método de Myers apontou platôs substancialmente antes de 80% da conclusão do exercício, o que pode ser indício de platôs submáximos (veja a subseção 3.2.2). Os platôs identificados pelo método de Patricio ocorrem em

média em 86,7% da duração do exercício, o que indica uma espécie de robustez, que desconsidera platôs submáximos. Essa característica já foi ressaltada em [Patricio et al. \(2021\)](#).

Por fim, a Tabela 4 apresenta a proporção de concordância entre os três métodos.

Tabela 4: Percentual de concordância entre modelo.

Metodo	Astorino	Myers	Patricio
Astorino	1	0.388	0.527
Myers	0.388	1.000	0.722
Patricio	0.527	0.722	1.000

Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram uma disparidade muito grande entre o método de Astorino e os demais, com diagnóstico concordando em, no máximo, 52,7% dos indivíduos (Astorino e Patricio). Essa divergência pode ser causada pelo fato de os dados se tratarem de indivíduos heterogêneos, de modo que o limiar de 2,1 mL/min/kg pode não ser capaz de representar características pessoais da dinâmica do platô nos indivíduos da amostra considerada. Os diagnósticos dos métodos de Myers e Patrício concordam em 72,2% dos indivíduos. Embora seja um valor maior do que o anterior, ainda apresenta uma discordância considerável que pode ser explicada pela suscetibilidade do método de Myers à platôs submáximos.

5 Conclusões e perspectivas Futuras

Este trabalho realizou um experimento de Monte Carlo para comparar métodos de detecção de platô comumente utilizados na literatura de Fisiologia do Exercício, especificamente os métodos propostos em [Astorino et al. \(2000\)](#) e [Myers et al. \(1990\)](#). No estudo, por ser uma proposta mais recente e com maior fundamentação estatística, também foi considerado o método proposto por [Patricio et al. \(2021\)](#). Os métodos também foram aplicados a dados de $\dot{V}O_2$ de 36 indivíduos submetidos ao protocolo de rampa partindo do repouso.

Os resultados da simulação de Monte Carlo mostram que, em termos de significância e poder empíricos, o método de Patrício é o que apresenta o melhor desempenho. Em termos de estimação do instante de platô, o método de Patrício também se mostrou mais eficaz, apresentando baixos vício e variância, com indícios de consistência.

Com respeito à aplicação, verificou-se que o método de Astorino apresenta o pior desempenho, apontando platô para quase todos os indivíduos (94,4% de platô) e discordando consideravelmente dos demais métodos. Os métodos de Myers e Patrício apresentam maior concordância, no entanto o método de Myers apresenta indício de antecipação do instante de platô, enquanto que o método de Patrício não fornece evidências de sofrer desse problema.

O estudo de simulação neste trabalho considerou dados sintéticos gerados de um modelo de regressão segmentado com dois pontos de quebra, com último slope fixado em zero para emular a dinâmica do $\dot{V}O_2$. No entanto, é sábio que o verdadeiro comportamento esperado para o protocolo de rampa é mais complexo do que o considerado neste trabalho. Veja [Rossiter \(2010\)](#), [Keir et al. \(2018\)](#) e [Patricio et al. \(2021\)](#) por exemplo. Nesse sentido, uma futura vertente deste trabalho se dará em considerar, no estudo de simulação, um cenário mais realista para a geração dos dados sintéticos, de maneira similar àquela em [Patricio et al. \(2021\)](#). Outra vertente será considerar outros métodos de identificação de platô e explorar outras escolhas de parâmetros para os métodos investigados neste estudo.

Referências

- Astorino, T. A. (2009). Alterations in $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ and the $\dot{V}O_2$ plateau with manipulation of sampling interval. *Clinical physiology and functional imaging*, 29(1):60–67.
- Astorino, T. A., Robergs, R. A., Ghiasvand, F., Marks, D., and Burns, S. (2000). Incidence of the oxygen plateau at $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ during exercise testing to volitional fatigue. *Journal of exercise physiology online*, 3(4).
- Beltrami, F. G., Wong, D. P., and Noakes, T. D. (2014). High prevalence of false-positive plateau phenomena during $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ testing in adolescents. *Journal of science and medicine in sport*, 17(5):526–530.
- Feder, P. I. (1975). The log likelihood ratio in segmented regression. *The Annals of Statistics*, 3(1):84–97.
- Gordon, D., Schaitel, K., Pennefather, A., Gernigon, M., Keiller, D., and Barnes, R. (2012). The incidence of plateau at $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ is affected by a bout of prior-priming exercise. *Clinical physiology and functional imaging*, 32(1):39–44.
- Hill, A. and Lupton, H. (1923). Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *QJM: Quarterly Journal of Medicine*, (62):135–171.
- Keir, D. A., Paterson, D. H., Kowalchuk, J. M., and Murias, J. M. (2018). Using ramp-incremental $\dot{V}O_2$ responses for constant-intensity exercise selection. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 43(9):882–892.
- Muggeo, V. M. (2003). Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in medicine*, 22(19):3055–3071.
- Myers, J., Walsh, D., Sullivan, M., and Froelicher, V. (1990). Effect of sampling on variability and plateau in oxygen uptake. *Journal of Applied Physiology*, 68(1):404–410.

- Niemeyer, M., Knaier, R., and Beneke, R. (2021). The oxygen uptake plateau—a critical review of the frequently misunderstood phenomenon. *Sports Medicine*, 51(9):1815–1834.
- Patricio, S. C., Sarnaglia, A. J., Molinares, F. A. F., and Azevedo, P. H. (2021). Oxygen uptake plateau diagnosis using a new developed segmented regression estimation method for autocorrelated data. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 68(11):3281–3289.
- Rivera-Brown, A. M. and Frontera, W. R. (1998). Achievement of plateau and reliability of $\dot{V}O_{2\text{m}\acute{a}\text{x}}$ in trained adolescents tested with different ergometers. *Pediatric exercise science*, 10(2):164–175.
- Rossiter, H. B. (2010). Exercise: kinetic considerations for gas exchange. *Comprehensive Physiology*, 1(1):203–244.
- Taylor, H. L., Buskirk, E., and Henschel, A. (1955). Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *Journal of applied physiology*, 8(1):73–80.
- Thomson, A. C., Ramos, J. S., Fassett, R. G., Coombes, J. S., and Dalleck, L. C. (2015). Optimal criteria and sampling interval to detect a $\dot{V}O_2$ plateau at $\dot{V}O_{2\text{m}\acute{a}\text{x}}$ in patients with metabolic syndrome. *Research in Sports Medicine*, 23(4):337–350.
- Vella, C. A., Marks, D., and Robergs, R. A. (2006). Oxygen cost of ventilation during incremental exercise to $\dot{V}O_{2\text{m}\acute{a}\text{x}}$. *Respirology*, 11(2):175–181.
- Yan, X. and Su, X. (2009). *Linear regression analysis: theory and computing*. world scientific.