

apunts

MEDICINA DE L'ESPORT

www.apunts.org



ARTICLE ESPECIAL

Aplicació de la pulsioximetria en proves d'esforç màxim

César Marca Fuertes^{a,*}, Mercedes Galindo Canales^{a,b}, Francisco Miguel-Tobal^b
i Pilar Martín Escudero^b

^aEscuela Profesional de Medicina de la Educación Física y del deporte, Facultad de Medicina, Universidad Complutense de Madrid, Espanya

^bI.N.E.F. de Madrid de la Universidad Politécnica de Madrid, Espanya

Rebut el 21 d'abril de 2010; acceptat el 2 de novembre de 2010

PARAULES CLAU

Pulsioximetria;
Saturació d'oxigen;
Ergometria;
Oxímetre de pols;
Dessaturació d'oxigen

Resum

La pulsioximetria s'utilitza per determinar el percentatge de saturació d'oxigen que hi ha a la sang. La seva característica més important és que es tracta d'un mètode no invasiu i relativament econòmic. Hi ha pocs estudis que relacionin la pulsioximetria amb l'activitat física i la majoria són clínics. Els autors revisen la definició de l'oximetria de pols i els fonaments sobre els quals es basa. Es revisa l'aplicació de la pulsioximetria en les proves d'esforç màxim, així com el comportament de la saturació d'oxigen a la sang durant la realització de proves d'esforç màxim. A més, es revisen els diferents estudis sobre els valors de saturació d'oxigen a la sang durant la realització d'exercici físic i la seva correlació amb altres variables ventilatòries. S'analitzen les conseqüències de l'ús de la pulsioximetria en proves d'esforç màxim.

© 2010 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Publicat per Elsevier España, S.L. Tots els drets reservats.

KEYWORDS

Pulse oximetry;
Oxygen saturation;
Exercise stress test;
Pulse oximeter;
Oxygen desaturation

The pulse oximetry and its use in maximal exercise test

Abstract

Pulse oximetry is used to determine the percentage saturation of oxygen in blood. Its main feature is that it is a noninvasive and relatively inexpensive. There are few studies relating physical activity and pulse oximetry with most abundant studies are clinical trials. The authors review the definition of pulse oximetry, the grounds upon which it is based. We review the application of pulse oximetry to maximum exercise testing, and the behavior of oxygen saturation in the blood for testing of maximum effort. In addition,

*Autor per a correspondència.

Correu electrònic: cesarmarcafuertes@hotmail.com (C. Marca Fuertes).

different studies on the oxygen saturation values in blood during physical exercise and its correlation with other ventilatory variables. We analyze the consequences of the use of pulse oximetry in tests of maximal effort.
 © 2010 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Introducció

La pràctica esportiva és un dels pilars bàsics de la societat del benestar en què vivim. L'exercici físic regular ben realitzat serveix per millorar les capacitats físiques bàsiques. És important saber que quan l'exercici es realitza de manera regular, es produeixen una sèrie d'efectes a curt i a llarg termini en l'organisme humà. Aquestes modificacions es realitzen en tots els sistemes del cos humà, però especialment en el sistema respiratori^{1,2}.

Relacionat amb això, cal cercar mètodes no invasius i més econòmics per determinar diferents valors fisiològics del cos humà durant la realització d'una prova d'esforç màxim.

La pulsioximetria

L'oximetria de pols és la pressió parcial d'oxigen a la sang³. La pulsioximetria s'utilitza durant la monitorització de pacients amb anestèsia, en control de nounats, en avaluació i seguiment de trastorns pulmonars crònics i nocturns, i en medicina de l'esport. A més, per aplicar l'oximetria de pols a l'exercici físic, ens interessarà l'oximetria de pols subcutània. Aquesta oximetria és defineix com la determinació del percentatge de saturació d'oxigen a la sang amb ajuda de mètodes fotoelèctrics⁴ (fig. 1). El seu ús s'ha estès en els darrers anys tant en proves d'esforç en clínica com, en menor mesura, en l'àmbit de la medicina de l'esport⁴⁻⁸.

La combinació de l'oximetria amb l'ergometria complementa la prova d'esforç, gràcies al control continu de la saturació d'oxigen en el torrent sanguini. Això és de gran importància per al diagnòstic i la valoració funcional dels sistemes respiratori i circulatori⁴.

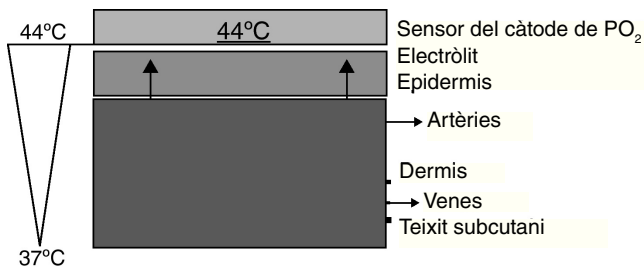
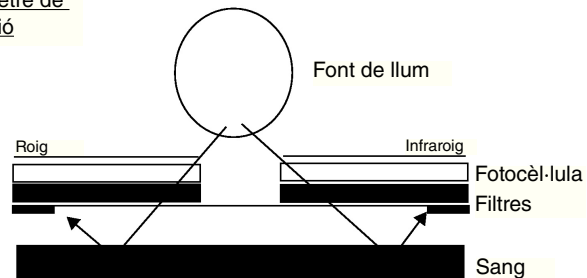


Figura 1 Principi de la mesura de la pressió d'oxigen. Modificacions a la pell. De Chapuis⁵.

Oxímetre de reflexió



Oxímetre de transmissió

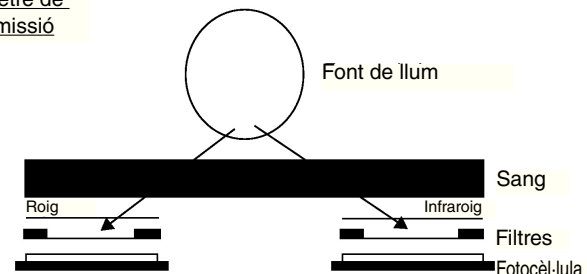


Figura 2 Principi de l'oximetria de transmissió i de reflexió. De Mellerowicz⁴.

Fonaments de la pulsioximetria

L'oxímetre de pols és un mètode espectrofotomètric de transil·luminació, el fonament científic del qual es basa en dos principis físics:

- La coneguda propietat de l'hemoglobina de presentar diferent espectre d'absorció segons que el seu estat sigui oxigenat o reduït.
- La presència d'un senyal polsàtil generat per la sang arterial però relativament independent de la sang venosa i capil·lar i altres teixits^{4,7}.

Per altra banda, aquests oxímetres poden ser de dos tipus: de transmissió (la llum emesa pel sensor travessa les estructures anatòmiques i la llum que surt és la que rep el sensor) o de reflexió (la llum emesa pel sensor es reflecteix en l'estructura anatòmica i la llum reflectida és la que rep el sensor) (fig. 2).

Aquesta llei de transmissió o absorció de la llum estableix que la concentració d'un solut en una solució es pot deter-

minar fent passar una llum, de longitud d'ona coneguda, a través de dita solució, tot mesurant la llum incident i la transmesa.

La llei física aplicada en aquest instrument és la llei de Lambert Beer, segons la qual la intensitat de llum transmesa per un cos és igual a la intensitat de llum que incideix per una variable.

Aquestes condicions no són aplicables al mitjà clínic, per la qual cosa els instruments de pulsioximetria, teòricament basats en la llei de Beer Lambert, requereixen de correccions empíriques a les quals s'arriba mitjançant aplicació de la tècnica a grans poblacions d'individus sans, i gràcies a això s'aconsegueix un algoritme mitjançant el qual el microprocessador de l'aparell interpreta la informació mesurada a través de la medicació⁴.

Aplicació de l'oximetria a les proves d'esforç màxim

En l'aplicació clínica de l'oximetria de pols, la cubeta seria el dit o el lòbul de l'orella, i la substància a determinar, l'oxihemoglobina. La mesura de l'absorció d'una llum d'intensitat coneguda a través del dit o de l'orella permet calcular la saturació de l'hemoglobina^{4,6}.

La importància de l'oximetria en l'ergometria no resideix tant en l'obtenció de valors absoluts de saturació d'oxigen, per a la qual cosa resulta més exacte l'anàlisi directe de la mostra arterial, sinó pel registre continu de canvis eventuals en la saturació d'oxigen i la seva realització per mètodes incruents des dels propis teixits, cosa que fa que aquesta tècnica sigui de fàcil ús, confortable per al pacient, portàtil i no massa cara^{4,6}.

Això no obstant, cal subratllar que l'oximetria ergomètrica fa un servei valuós en les investigacions de rutina, però, segons alguns autors, en les investigacions més delicades i que han d'oferir un estudi detallat dels processos fisiològics i patològics de la respiració durant l'esforç físic, els seus serveis són més discutibles, cosa que fa que aquestes investigacions només siguin possibles per mitjà de l'espirometria i per l'anàlisi de gasos a la sang arterial, a través de les quals també es pot determinar el contingut i la pressió de CO₂ i el pH. Així, quan es sospita de l'existència d'alteracions en la difusió, resulta valuosa sobretot la combinació de l'oximetria amb l'anàlisi directe de gasos a la sang arterial, per tal de diferenciar exactament la causa de la caiguda de la saturació d'oxigen^{4,6}.

L'oximetria ergomètrica és un mètode apropiat per determinar el límit d'esforç cardiopulmonar, que es caracteritza per una caiguda significativa en la saturació arterial d'oxigen. Tant el mètode de transmissió com el de reflexió de la llum poden ser emprats per finalitats pràctiques si els resultats són analitzats amb el coneixement suficient i la crítica adequada^{4,6}.

Pel que fa al valors, Comroe i Walker han observat que la saturació d'oxigen de la sang arterial puja a 97,5% en persones sanes en repòs, mentre que segons Mitschell i col·laboradors és d'un 97,1 ± 3,1%⁴.

Segons diversos autors (Bühlmann, Bühlmann y Schaub, Christensen i Högberg, Comroe i Walker, entre altres), una

caiguda de la saturació de la sang arterial és de caràcter fisiològic quan es dona en persones sanes, després d'haver fet un gran esforç físic. En principi, es creu que aquest comportament és degut a l'acidosi present en els nivells elevats d'esforç físic, així com a l'augment de la pressió del CO₂ a la sang.

Pel que fa a la intensitat de l'esforç, es pot afirmar que les zones de càrrega submàxima no manifesten un descens constant del PO₂; és més, un descens inicial i més o menys accentuat del PO₂ és degut, per regla general, a un valor augmentat de l'oxigen durant el repòs⁴.

Referent a les variacions en la saturació arterial observades després del màxim esforç estudiat, Rasmussen et al^{9,10} han vist que la dessaturació arterial associada a l'esforç màxim realitzat és proporció directa de la massa muscular posada en moviment, de la concentració de lactat sanguini, de bicarbonat i de la concentració de hidrogenions^{6,9,10}.

Resulta digne de menció la gran variació individual dels valors durant les fases de repòs i de recuperació, mentre que durant l'esforç s'observa un agrupament important entorn al valor mitjà^{4,6}.

Els individus entrenats, capaços d'alts rendiments, poden realitzar esforços elevats sense presentar hiposaturació considerable d'oxigen. Durant els esforços màxims, les persones molt entrenades presenten una hiposaturació d'oxigen (amb hipercàpnia i acidosi) que, en alguns casos, no arriba a equilibrar-se totalment, fins i tot amb una elevació de la pressió parcial alveolar d'oxigen durant la respiració^{4,6}.

D'acord amb la proposta de Bühlmann, sembla ser que els estadis amb increments progressius de l'esforç de 10 a 30 watts són la millor manera de determinar la saturació arterial d'oxigen, gràcies al manteniment d'un esforç estable⁴.

Sobre el comportament de la PO₂ arterial durant la recuperació, tothom està d'acord en qui hi ha un augment intens, immediatament després d'acabar l'esforç. Les pressions parcials d'oxigen assoleixen, generalment, els valors inicials de 10 a 15 min després del final de l'esforç^{4,6}.

L'oxímetre de pols és un mètode de laboratori no invasiu i una eina de diagnòstic per al seguiment continu de la SaO₂. Això no obstant, la seva precisió i reproductibilitat continuen essent dubtoses per l'acció d'artefactes i altres variacions¹¹.

Hi ha pocs estudis de validació que jutgin els resultats obtinguts per l'oxímetre de pols sota condicions de compromís potencial del flux sanguini perifèric, malgrat l'elevat nombre de factors que sembla que afecten a la precisió de l'oxímetre quan s'utilitzen durant l'exercici i que necessiten ser investigats en els assaigs¹¹.

Entre aquests assaigs s'inclou l'aparició de possibles artefactes, tals com la influència de la suor i la perfusió local dels teixits¹²⁻¹⁴. També hi ha els efectes mesurats per l'estrés (exercicis o altres) que a la vegada produeixen una vasoconstricció mesurada per la influència simpàtica, que redueix teòricament el flux de sang i influeix sobre l'eficàcia de l'oxímetre de pols en determinades condicions¹²⁻¹⁴.

Un dels problemes sorgits en el moment d'utilitzar-lo és el factor de la temperatura corporal. Segons estudis realitzats, per una millor utilització de l'oxímetre és necessari que la temperatura es mantingui entre 44 o 45 °C i no a

37 °C, pels motius següents (tot i que es puguin produir petites cremades en aplicar-lo als nens):

- Gràcies a la vasodilatació cutània que es produeix durant l'escalfament de la pell, es crea un engrandiment dels capil·lars dèrmics, cosa que afavoreix una millor aportació tissular d'oxigen i una desviació de la corba de saturació de l'hemoglobina cap a la dreta. Això contraresta l'activitat metabòlica cel·lular i el VO_2 ¹⁵⁻¹⁷.
- Per altra banda, a 41 °C, l'estructura lipídica de la capa còrnia de la pell pateix una modificació de gel a sol, amb la qual cosa la resistència a la difusió disminueix i la permeabilitat gasosa es facilita entre 100 i 1.000 vegades¹⁸. Fins i tot alguns estudis parlen d'un canvi en la perfusió local que fa que la mesura de la tensió d'oxigen arterial sigui més petita que la que existeix en el teixit¹⁹.

A més, s'està introduint en la pràctica comuna dels especialistes en ciències i medicina de l'esport, com a rutina, la monitorització dels nivells de SaO_2 amb oxímetres de pols, durant la realització d'un exercici exhaustiu, per poder informar de les limitacions de la forma física^{6,12-14}.

Actualment creix l'interès per l'ús de l'oxímetre de pols en la valoració del sistema pulmonar com a factor limitant en la forma física dels atletes de resistència (a més d'un efecte del pH), i això mitjançant l'estimació de la fracció d'oxihemoglobina arterial del total de l'hemoglobina durant l'exercici per evitar les inconveniències i alteracions atzaroses associades a catèters arterials durant l'exercici en els humans^{20,21}.

El principal problema amb què ens trobem és la manca d'estudis referents tant a la presa de la mostra com en la validació de l'ús de l'oxímetre de pols en la població atlètica durant l'exercici^{6,12-14}.

Sobre els estudis efectuats al respecte fins a l'actualitat i referits a la bibliografia, trobem en primer lloc els de Morton¹²⁻¹⁴, que observà la precisió de l'oxímetre de pols en situacions d'esforç intens en 10 atletes sotmesos a 3 proves d'esforç exhaustiu diferents, una que va requerir la intensitat del VO_2 màxim, una altra que buscava el 115% del VO_2 màxim (S_{max}) i finalment una que determinava el S_{max} quan el flux d'oxigen (FiO_2) patia un increment de 0,30^{6,12-14}.

Els resultats d'aquest estudi indicaven una relativa gran subestimació de la SaO_2 quan es monitoritzava utilitzant l'oxímetre de pols, amb errors que augmentaven en funció de la severitat de l'exercici (fins i tot excedien més de dues vegades el nivell de tolerància especificat pel rang de manufactura de la SaO_2 , observat en aquests estudis)^{6,12-14}.

A Espanya, diversos estudis han demostrat que l'oximetria en registre continu és un mètode útil, senzill, força precís a l'hora d'estudiar l'oxigenació de les persones que realitzen esforç físic, tot i que té alguna limitació, com poden ser les interferències, produïdes en l'absorció espectrofotomètrica^{6,22}.

L'oximetria transcutània aplicada a l'estudi del transport d'oxigen permet un seguiment continu del que succeeix a nivell perifèric, a diferència d'altres tècniques de medicació externa cruenta⁶.

Durant la realització de l'estudi oximètric en proves d'esforç màxim, es produeixen diversos problemes tècnics, derivats del moviment de l'individu durant la realització de les diferents tipus de proves d'esforç⁶. Quan les proves es

realitzen a la cinta de córrer hi ha un major nombre d'artefactes que quan es realitzen en el cicloergòmetre²³.

Tots els esportistes estudiats mostren un descens significatiu dels valors de saturació transcutània d'oxigen, sense haver-hi trastorns pulmonars previs que ho justifiquin, cosa que es produeix en funció de l'esforç desenvolupat⁶.

Hi ha una correlació significativa entre el temps de desaturació, mesurat en l'oximetria en registre continu durant l'esforç, i el consum màxim d'oxigen. Aquesta correlació també es dona en el temps d'aparició dels lindars aeròbic i anaeròbic, en atletes d'ambdós sexes^{6,24}. En estudis realitzats amb l'objectiu de trobar correlació entre les variables proporcionades per la prova d'esforç màxim i les variables de l'oximetria de pols transcutània, s'observen correlacions entre el temps de dessaturació i el consum màxim d'oxigen i el llindar anaeròbic (segon llindar del lactat). En estudis realitzats amb l'objectiu de buscar correlació entre les variables proporcionades per la prova d'esforç i les variables de l'oximetria transcutània s'observen correlacions entre el temps de dessaturació i el consum màxim d'oxigen i el llindar anaeròbic (segon llindar del lactat)^{24,25}.

A l'hora de valorar l'evolució que es produeix en la saturació d'oxigen en el temps, si ho fem tenint en compte el consum màxim d'oxigen de cada individu, obtindrem una correlació alta entre aquest darrer, i el temps mitjà de desaturació d'oxigen⁶.

La correlació lineal instantània entre la saturació d'oxigen i les variables ventilatòries (pols, ventilació minut i consum màxim d'oxigen) és estadísticament significativa i de sentit contrari, la qual cosa ens porta a confirmar l'aparició de la dessaturació d'oxigen, deguda a l'esforç físic en els esportistes estudiats⁶.

Finalment cal destacar que la correlació entre la saturació d'oxigen i les variables ventilatòries (pols, ventilació minut i consum màxim d'oxigen) és més forta si s'agrupa als individus per esports practicats. Això ens pot portar a suggerir que la pràctica esportiva influeix en la significació de la regressió lineal^{6,26}.

Conseqüències de l'ús de la pulsioximetria en les proves d'esforç màxim

L'ús de l'oximetria de pols en les proves d'esforç màxim per determinar els valors de saturació d'oxigen en els esportistes té les conclusions següents:

- Els valors de saturació d'oxigen s'obtenen de manera no invasiva²⁷.
- Els pulsioxímetres comercials no serveixen per determinar els valors de saturació d'oxigen durant la realització de proves d'esforç màxim²⁸⁻³¹.
- En diversos estudis, el comportament de la saturació d'oxigen durant la realització de proves d'esforç màxim ha estat similar segons els valors obtinguts per pulsioximetria²⁸⁻³¹.
- No existeixen massa estudis que relacionin oximetria de pols amb exercici físic. La majoria d'estudis són a nivell clínic.
- L'oximetria ergomètrica és un mètode apropiat per determinar el límit d'esforç cardiopulmonar.

Conflicte d'interessos

Els autors declaren no tenir cap conflicte d'interessos.

Bibliografia

1. Åstrand PO, Rodahl K. Fisiología del trabajo físico. Buenos Aires: Panamericana; 1986.
2. Casaburi R. Physiologic responses to training. *Clin Chest Med*. 1994;15:215-28.
3. Rolly G, Verschelen L. Oxymétrie de pouls. *Ann Fr Anesth Réanim*. 1989;8:171-4.
4. Mellerowicz H. Ergometría. 3.ª ed. Buenos Aires: Panamericana; 1984.
5. Chapuis A. Mesure de la PO₂ transcutané. *Soins*. 1990;534:55-7.
6. Martín Escudero M. La oximetría en registro continuo en el esfuerzo máximo en distintas especialidades deportivas. [Tesis.] En: *Medicina Interna*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid; 1997. p. 232.
7. Tobin RM, Pologe JA, Batchelder PB. A characterization of motion affecting pulse oximetry in 350 patients. *Anesthesia and analgesia*. 2002;94 Suppl 1:S54-S61.
8. Breuer HW, Groeben H, Schöndeling H, Worth H. Comparative analysis of arterial oxygen saturations during exercise by oximetry, photometric measurements, and calculation procedures. *Int J Sports Med*. 1990;11:22-5.
9. Whitney J. The measurement of oxygen tension in tissue. *Nurs Res (NY)*. 1990;39:203-6.
10. Rasmussen J, Hanel B, Diamant B, Secher NH. Muscle mass effect on arterial desaturation after maximal exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 1991;23:1349-52.
11. Norton LH, Squires B, Craig NP, McLeay G, McGrath P, Norton KI. Accuracy of pulse oximetry during exercise stress testing. *Int J Sports Med*. 1992;7:523-7.
12. Morton RH. On a model in human bioenergetics. *Eur J Appl Physiol*. 1985;54:285-90.
13. Morton RH. The critical power and related whole-body bioenergetic models. *Eur J Appl Physiol*. 2005;96:339-54.
14. Morton RH. A three component model of human bioenergetics. *J Math Biol*. 1986;24:451-66.
15. Vayssairat M, Baudot N. La microcirculation: Mesure de la pression partielle transcutanée d'oxygène et intérêt de l'hémodynamique. *Presse Med*. 1989;18:1315-16.
16. Tremper K, Waxman K, Shoemaker W. Effects of hypoxia and shock on transcutaneous pO₂ values in dogs. *Crit Care Med*. 1979;12:526-31.
17. Lübbers D. Theoretical basis of the transcutaneous blood gas measurements. *Crit Care Med*. 1981;9:721-33.
18. Davis SL, Fadel PJ, Cui J, Thomas GD, Crandall CG. Skin blood flow influences near-infrared spectroscopy-derived measurements of tissue oxygenation during heat stress. *J Appl Physiol*. 2006;100:221-4.
19. Larsen PN, Moesgaard F, Gottrup F, Helledie N. Characterization of the silicone tonometer using a membrane-covered transcutaneous electrode. *Scand J Clin Lab Invest*. 1989;49:513-19.
20. Martin D, Powers S, Cicale M, Collop N, Criswell D. Validity of pulse oximetry during exercise in elite endurance athletes. *J Appl Physiol*. 1992;72:455-8.
21. Rasmussen J, Hanel B, Diamant B, Secher N. Muscle mass effect on arterial desaturation after maximal exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 1991;23:1349-52.
22. González A, Gómez Arnau J, Pensado A. Limitación en la utilización clínica de la pulsioximetría. *Rev Esp Anestesiología y Reanimación*. 1992;39:100-6.
23. Martín-Escudero P, Miguel-Tobal F, Bilbao Monasterio A, Galindo Canales M, Silveira Martín JP, Dotor Castilla ML, et al. Pulse rate measurement from transmittance photoplethysmography in cycle ergometer test. Texas: IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference [Abstract]; 2010. p. 1039.
24. Martín-Escudero P, Miguel-Tobal F, Bilbao Monasterio A, Galindo Canales M, Silveira Martín JP, Dotor Castilla ML, et al. Aportaciones fisiológicas de la medida continua de la saturación de oxígeno en atletas de ambos sexos que realizan pruebas de esfuerzo máximas. *Selección*. 2006;15:132-43.
25. Galindo Canales M. La determinación de la saturación de oxígeno en la prueba de esfuerzo como parámetro útil de determinación del umbral anaeróbico [Trabajo de investigación para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (D.E.A.) y la Suficiencia Investigadora, dirigido por Pilar Martín Escudero]. Septiembre de 2009.
26. Siegler JC, Robergs RA, Faria EW, Wyatt FB, McCarthy J. Noninvasive profiling of exercise-induced hypoxemia in competitive cyclist. *Research in Sports Medicine*. 2007;15:61-6.
27. Mendelson Y. Pulse oximetry: Theory and applications for noninvasive monitoring. *Clin Chem (Baltimore)*. 1992;38:1601-7.
28. Martin D, Powers S, Cicale M, Collop N, Huang D, Criswell D. Validity of pulse oximetry during exercise in elite endurance athletes. *J Appl Physiol*. 1992;72:455-8.
29. Orenstein DM, Curtis SE, Nixon PA, Hartigan ER. Accuracy of three pulse oximeters during exercise and hypoxemia in patients with cystic fibrosis. *Chest*. 1993;104:1187-90.
30. Iyriboz Y, Powers S, Morrow J, Ayers D, Landry G. Accuracy of pulse oximeters in estimating heart rate at rest and during exercise. *Br J Sports Med*. 1991;25:162-4.
31. Rebuck A, Chapman K, D'Urzo A. The accuracy and response characteristics of a simplified ear oximeter. *Chest*. 1983;83:860-8.