

Avaliação dos efeitos da altitude sobre a visão

Analysis of vision effects at altitude

Luiz Filipe de Albuquerque Alves¹, Alexandre Sampaio de Abreu Ribeiro², Lívia Mello Brandão³, Roberto de Almeida Teixeira⁴, Tiago Bisol⁵

RESUMO

Este trabalho de revisão bibliográfica é direcionado para a investigação dos efeitos da hipóxia da altitude sobre a visão. Pretende assim, ser uma contribuição na identificação dos sinais e sintomas presentes durante a exposição do aeronavegante às altas altitudes. O conhecimento sobre as características da atmosfera terrestre e o comportamento dos gases quando submetidos à variação de pressão atmosférica são muito importantes para o correto diagnóstico dos disbarismos, hipóxia e doença da descompressão para os profissionais de saúde voltados para a atividade aeroespacial. O ambiente atmosférico a que os aeronavegantes são expostos, é capaz de interferir de forma significativa na função visual, podendo gerar lesões de caráter reversíveis ou não, tais como: hemorragias retinianas, diminuição da visão noturna e da acuidade visual, restrição do campo visual, aparecimento de estrabismos latentes, diminuição da pressão intra-ocular e alterações refracionais em indivíduos previamente submetidos às cirurgias refrativas.

Descritores: Hipóxia Encefálica; Doença da descompressão; Medicina aeroespacial
Altitude; Visão/fisiologia; Pressão atmosférica; Visão/fisiologia; Revisão

¹Capitão Médico da seção de oftalmologia do Hospital Central da Aeronáutica – Rio de Janeiro (RJ), Brasil;

²Residente da seção de oftalmologia do Hospital Central da Aeronáutica – Rio de Janeiro (RJ), Brasil;

³Residente da seção de oftalmologia do Hospital Central da Aeronáutica – Rio de Janeiro (RJ), Brasil;

⁴Coronel Médico da seção de oftalmologia do Hospital Central da Aeronáutica – Rio de Janeiro (RJ), Brasil;

⁵Tenente Médico da seção de oftalmologia do Hospital Central da Aeronáutica – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

INTRODUÇÃO

Analisar os efeitos da hipóxia hipobárica sobre a visão durante a atividade aérea constitui o objetivo geral desta revisão. A compreensão dos mecanismos fisiopatológicos da hipóxia sobre a visão e a identificação dos sintomas iniciais constituem fatores importantes para segurança de voo.

Considerando o perfeito funcionamento da visão como condição essencial para o aeronavegante em todas as fases do voo, é importante o conhecimento de que as alterações iniciais causadas pela hipóxia podem comprometer a identificação de objetos à distância, além de detalhes de forma e cor. Pelo mesmo motivo, o campo visual pode ser afetado, gerando erro de julgamento na medida das distâncias e no movimento de objetos no campo periférico⁽¹⁾.

Embora muitas pesquisas tenham sido realizadas nesta área, a obtenção de dados sobre as reações fisiopatológicas do ser humano exposto ao ambiente hipobárico é obtida, em sua maioria, por estudos realizados em altitude de montanha, sendo os resultados, reproduzidos para condições de voo.

Quando avaliamos os fatores que interferem na visão durante a atividade aérea podemos citar: hipóxia hipobárica, excessiva exposição à energia eletromagnética, acelerações, descompressão, vibrações e outros⁽¹⁾.

O estudo da fisiologia relacionada às altitudes, a análise dos limites fisiológicos relacionados ao exercício da atividade aérea, assim como a observação das alterações oftalmológicas relacionadas à hipóxia hipobárica têm como objetivo informar e facilitar a identificação dos sintomas presentes durante o voo de aeronaves militares ou não militares.

O incremento da altitude, por estar associado ao decréscimo da pressão barométrica e, paralelamente, ao da pressão parcial de oxigênio inspirada (PIO₂), promove alterações no conteúdo arterial de oxigênio e assim, na quantidade de oxigênio fornecida aos tecidos. A visão é o primeiro dos sentidos a ser afetado pela diminuição do oxigênio tecidual, fato este evidenciado pela diminuição da visão noturna⁽¹⁾.

A atmosfera terrestre pode ser definida como uma fina camada de gases sem cheiro, sem cor e sem gosto presa a Terra pela força da gravidade. Ao nível do mar, a pressão atmosférica é de aproximadamente 760 mmHg e a fração de oxigênio na atmosfera é de 21%. Os efeitos fisiológicos dos gases inspirados são determinados pela pressão parcial do gás. Este valor é calculado multiplicando-se a pressão atmosférica (valor absoluto 1 ATA = 760 mmHg) pela fração do gás existente

em determinada altitude. A pressão parcial do oxigênio ao nível do mar, por exemplo, é de 0.21 ATA.

A partir da mesma fórmula, no ponto mais alto do Monte Everest, 29.028 pés, a pressão atmosférica será de 253 mmHg ou 0.33 ATA. Nesta condição, a pressão parcial de oxigênio esperada seria de 0.07 ATA, correspondendo a 7% da PO₂ respirado ao nível do mar, resultando em hipóxia hipobárica⁽¹⁾.

A pressão atmosférica é influenciada pela altitude, latitude e temperatura. Uma altitude de 5.500m (18.000 pés) corresponde à metade da pressão ao nível do mar, 10.000m, a um quarto e 30.000m, de 8mmHg. Considerando esse último um valor baixíssimo, praticamente toda a massa atmosférica está abaixo de 30 km⁽²⁾.

A atmosfera encontra-se estruturada em três camadas relativamente quentes, separadas por duas camadas relativamente frias. São elas: troposfera (0-7 / 17 km), estratosfera (7 / 17-50 km), mesosfera (50-80 / 85 km) e termosfera (80 / 85-640 km). A troposfera é a camada de maior importância para a aviação, correspondendo a 80% da densidade da atmosfera e também, sendo o local onde ocorrem todos os fenômenos meteorológicos. Na estratosfera a temperatura aumenta com a altitude. Muitos aviões a jato circulam nesta camada por ser bastante estável. É nela que existe maior concentração de ozônio e onde começa a difusão da luz solar que origina o "azul do céu"⁽²⁾.

O conhecimento das propriedades físicas dos gases⁽²⁾ é fundamental para compreensão da resposta do organismo à altitude. O estudo das leis dos gases permite o entendimento dos fenômenos relacionados aos disbarismos, à hipóxia, à doença da descompressão e outros. Tais eventos, sob as condições do meio aeroespacial, se apresentam de forma totalmente diferente quando comparados àqueles ocorridos na superfície terrestre.

Segundo a Lei de Boyle-Mariotte, o volume ocupado por uma mesma massa gasosa é inversamente proporcional às pressões que o mesmo suporta, sob uma mesma temperatura. Assim, podemos entender os efeitos da altitude sobre os órgãos cavitários do organismo (estômago, intestinos, ouvidos, seios da face). Na subida de uma aeronave, ocorre uma expansão gasosa conseqüente à queda da pressão barométrica. Na descida da aeronave, o inverso é verdadeiro.

De acordo com a Lei de Dalton, em uma mistura gasosa, a pressão de cada componente gasoso é independente da pressão dos demais e a pressão total, determinada pela soma da pressão parcial de cada componente da mistura. Embora, a percentagem de oxigênio do ar permaneça constante em qualquer altitude atmos-

férica, a deficiência de oxigênio - a hipóxia - se instala como decorrência da queda da pressão atmosférica e conseqüente queda da pressão parcial do oxigênio no ar ambiente e no ar alveolar, pela diminuição das trocas gasosas.

Respostas fisiológicas à hipóxia da altitude

O aparecimento e a intensidade dos sintomas da hipóxia dependerão dos seguintes fatores: altitude absoluta de vôo, velocidade de ascensão, duração da exposição à baixa pressão atmosférica, temperatura ambiente, atividade física e fatores individuais (enfermidades existentes, tolerância própria, aptidão física, emotividade, aclimatação)⁽¹⁾.

Segundo Thomas, até certos limites, o mecanismo compensador de adaptação fisiológica permite a manutenção da homeostase, lançando mão de alguns mecanismos compensatórios: aumento da ventilação pulmonar, aumento da afinidade da hemoglobina pelo oxigênio, aumento na capacidade de difusão pulmonar e vascularização tissular, e aumento na concentração de hemoglobina⁽¹⁾.

A exposição do organismo humano a ambientes com baixa concentração de oxigênio pode ocorrer, basicamente, de duas formas: aguda e crônica. A forma aguda pode ser observada principalmente na aviação. Já a forma crônica, diz respeito a situações onde o organismo pode se beneficiar através dos mecanismos compensatórios já mencionados anteriormente⁽¹⁾.

Durante a hipóxia aguda, observa-se uma graduação de estágios, cujas alterações fisiológicas variam de acordo com a altitude da seguinte forma:

a) Estágio indiferente - ocorre do nível do mar até cerca de 2000 m (cerca de 6000 pés). A saturação da hemoglobina cai até 92%. As frequências cardíaca e respiratória aumentam, compensando eficazmente a diminuição da pressão parcial do oxigênio no ar inspirado. Ocasionalmente, o eletrocardiograma se altera;

b) Estágio compensatório - ocorre de 2000 m até cerca de 4000 m (cerca de 12000 pés). Observamos queda na saturação da hemoglobina pelo oxigênio até 85%. Neste estágio, as compensações fisiológicas geralmente proporcionam uma adequada proteção contra hipóxia, de modo que seus efeitos, via de regra, não se manifestam, a menos que o período de exposição seja prolongado ou que exercícios físicos sejam efetuados;

c) Estágio das perturbações - ocorre de 4000 m até 6500 m (cerca de 20000 pés). A saturação da hemoglobina pelo oxigênio cai para 80% ou 70%. Neste estágio, também chamado de estágio da hipóxia crescente, as compensações fisiológicas já não são suficientes para compensar o déficit de oxigênio nos tecidos.

Aparecem sintomas como a fadiga, sonolência, tonturas, cefaléia, às vezes, euforia. A visão e a audição estão diminuídas e o raciocínio é deficiente. Há perda de memória e as reações se tornam lentas e descoordenadas. Já é possível observar cianose de extremidades (coloração azulada da pele, mãos e mucosas dos lábios);

d) Estágio crítico - ocorre acima de 6500 m. A saturação de hemoglobina pelo oxigênio cai para 60% ou menos. Neste estágio teremos alterações de consciência, podendo ocorrer convulsão seguida de colapso respiratório e morte;

e) Hipóxia fulminante - ocorre após a perda acidental do fornecimento de oxigênio de forma súbita. Nesta situação, se a perda de oxigênio se verifica abaixo de 12000 m (38000 pés) as alterações descritas anteriormente ocorrem de forma acelerada. Caso a perda ocorra acima desta altitude, o indivíduo torna-se inconsciente e seu organismo entra em colapso abruptamente, sem sintomas que preannuncio tais acontecimentos. Nesta situação o indivíduo muitas vezes não se recorda do fato, quando reavivado.

Ainda avaliando os sintomas e limites fisiológicos encontrados na exposição à hipóxia aguda, define-se Tempo Útil de Consciência (TCU) como o tempo decorrido entre a perda de suprimento de oxigênio até a falha de desempenho⁽²⁾. O TCU pode ser experimentalmente determinado, na câmara hipobárica (baixa pressão simulada), pelos testes psicomotores. A atividade física, mesmo moderada, reduz o TCU em até 50%⁽¹⁾.

Efeitos da hipóxia sobre a visão

Denomina-se hipóxia a diminuição de oxigênio fornecido aos tecidos através do sangue. Relacionado aos fatores determinantes, pode-se classificar a hipóxia em quatro tipos: A hipóxia hipoxêmica ou hipobárica, resultante da queda da PIO₂ (pressão parcial do oxigênio no ar inspirado), encontrada em altas altitudes. Hipóxia estagnante, também chamada de isquêmica, resulta de uma deficiência circulatória e é o tipo encontrado na vigência de uma insuficiência cardíaca congestiva, de uma insuficiência circulatória periférica ou de um efeito G positivo. A hipóxia anêmica resulta da deficiência no transporte do oxigênio aos tecidos, causada pela baixa concentração de hemoglobina no sangue. A hipóxia histotóxica é encontrada nos quadros de intoxicações por cianetos, onde se observa bloqueio bioquímico do oxigênio no nível celular⁽²⁾.

A visão é o primeiro sentido a ser afetado pela diminuição de oxigênio tecidual, sendo tal fato evidenciado pela diminuição da visão noturna. Nota-se enfra-

quecimento e incoordenação da musculatura extra-ocular, além da diminuição da amplitude de acomodação, gerando borramento visual para perto ⁽¹⁾.

Na chamada zona de indiferença, compreendida entre o nível do mar até 3000m, a visão diurna não é afetada, entretanto, pequena diminuição na visão noturna já pode ser observada, sendo preconizado aos combatentes de aeronaves, o uso de equipamentos de oxigênio durante missões noturnas ⁽¹⁾.

Na zona de adaptação ou estágio compensatório, localizada entre 3000m a 5000m, observa-se alguns prejuízos na visão, porém essas dificuldades podem ser superadas para conclusão da tarefa ou missão. A essa altitude observa-se vasos retinianos escurecidos e cianóticos; arteríolas demonstram um aumento compensatório de 10% a 20% no seu diâmetro; o volume de sangue na retina aumenta em aproximadamente quatro vezes; ocorre leve aumento pressórico nas arteríolas retinianas e ao longo de todo sistema pressórico vascular; o diâmetro pupilar diminui; e a 5000 m ocorre perda de aproximadamente 40% da visão noturna. O reflexo de acomodação-convergência diminui significativamente, podendo descompensar as forias ou estrabismos latentes. Todas essas alterações citadas podem se normalizar quando o piloto retornar a baixa altitude ou usar oxigênio complementar. Mecanismos fisiológicos de compensação são capazes de manter o desempenho dos pilotos e sua tripulação por longo período até o retorno ao solo ⁽¹⁾.

A zona de compensação parcial ou estágio das perturbações, compreendida entre 5000 a 8000 m, é assim chamada porque os mecanismos fisiológicos de compensação se tornam ineficazes no combate à falta de oxigênio. Os distúrbios visuais descritos anteriormente se tornam mais severos, o tempo de reação e a resposta aos estímulos visuais se tornam mais lentos. As forias ou estrabismos latentes não podem ser mais compensados, surgindo as heterotropias e diplopias. A acomodação e a convergência estão enfraquecidas tornando a visão de perto borrada e com diplopia. A visão noturna está, neste estágio, seriamente comprometida. Caso a permanência não seja muito prolongada, ainda é possível a recuperação e reversão total deste quadro com o uso de oxigênio ou retorno ao solo ⁽¹⁾.

Acima de 8000m, na chamada zona de descompensação ou estágio crítico, ocorre colapso circulatório com perda da visão e consciência, podendo levar a lesões permanentes na retina e no cérebro, causadas pela falta de circulação e hipóxia ⁽¹⁾.

Aeronaves comerciais e militares com cabine pressurizada mantêm uma altitude equivalente de

2500m ⁽¹⁾. Observando os efeitos visuais citados anteriormente, a essa altitude, exceto pela visão noturna, não se observa alterações significativas. Porém, é importante considerar que essas zonas de adaptação são classificadas em altitudes menores para fumantes, devido aos efeitos do monóxido de carbono ⁽¹⁾.

Analisando-se os efeitos da hipóxia sobre a visão em exercício da atividade aérea, os trabalhos demonstram alguns aspectos mais relevantes que devem ser considerados.

É descrito que a hipóxia diminui a atividade das células ganglionares da retina, interferindo na visão fotópica (visão diurna e percepção das cores) e escotópica (visão noturna) ⁽³⁾. As alterações no campo visual, caracterizada por marcada contração de isópteras, foram observadas à altitude de 20.000 pés, sendo revertida após 5 minutos de oxigênio. Já o reflexo de acomodação-convergência apresenta decréscimo de 47% a 20.000 pés, em estudo realizado em câmara hipobárica, sendo revertido rapidamente com o uso de oxigênio ⁽⁴⁾. A pressão intra-ocular (PIO) sofre significativo decréscimo com a altitude, devido a hipóxia levar à alcalose respiratória e à inibição da anidrase carbônica, gerando menor produção de humor aquoso e diminuição da PIO ⁽⁵⁾.

A altitude não parece ter efeito significativo sobre o sistema refrativo dos olhos de indivíduos que não apresentam patologias ou cirurgias oculares prévias. A estabilidade do poder refracional do sistema óptico ocular foi demonstrada em altitudes de até 17.000 pés (cerca de 5.100 metros), onde medidas de curvatura corneana e refração sob cicloplegia não se alteraram, sugerindo não haver alteração do poder dióptrico da córnea, do cristalino ou do comprimento axial do globo ocular ⁽⁶⁾.

Entretanto, indivíduos que possuem córneas alteradas por cirurgias refrativas corneanas e são submetidos à hipóxia podem sofrer repercussões ceratométricas e refracionais, que variam conforme a técnica cirúrgica utilizada e dioptria corrigida no procedimento.

Ao contrário da córnea normal, que, apesar de apresentar espessamento na altitude causado pela hipóxia, não apresenta alteração na sua curvatura ⁽⁷⁾, as córneas submetidas à ceratotomia radial desenvolvem um aplanamento significativo de sua curvatura central, que pode chegar a até 4 dioptrias, e que parece variar conforme a intensidade de miopia corrigida pela cirurgia e o tempo e intensidade de exposição a hipóxia ⁽⁸⁾. Este aplanamento se manifesta por uma hipermetropização, com redução da acuidade visual não corrigida e capacidade de leitura de perto. A fisiopatogenia provável deste processo seria o desenvolvimento de edema estromal peri-incisional na região

periférica corneana, causando aumento de sua curvatura nessa área e aplanamento da região central, responsável pela acuidade visual. Mesmo com aumento da espessura corneana causado pela hipóxia da altitude, a curvatura central corneana se mantém estável, bem como a refração⁽⁹⁾.

A refração de indivíduos submetidos a ceratotomia foto-refrativa (Photorefractive Keratectomy – PRK) na altitude não demonstra variação significativa, ao contrário da CR, a qual induz hipermetropia na altitude⁽⁹⁾.

As limitações da técnica PRK em relação à altitude parecem se limitar a problemas como opacidade corneana difusa superficial, conhecida como haze, que ocorre com maior frequência na correção cirúrgica de dioptrias elevadas, e alterações como ofuscamento e visualização de halos quando da dilatação da pupila em condições de baixa luminosidade⁽⁹⁾.

Já nos indivíduos submetidos à técnica de *ceratomileusis in situ* por laser (Laser in situ Keratomileusis – LASIK), atualmente preferida por grande parte dos cirurgiões refrativos pela sua menor incidência de haze corneano quando da correção de dioptrias mais elevadas, o comportamento da refração na altitude é bastante peculiar. Estudo recente demonstrou que em correção de baixas dioptrias (-2,5 a -4,0) de miopia o comportamento da refração é estável na altitude, sem queixas subjetivas em altitudes de até 26000 pés (cerca de 7.800 metros. Já em correções de miopias mais elevadas (de -4,5 a -8,0) têm-se observado a ocorrência de miopização, com piora da acuidade não corrigida para longe e melhora para perto⁽¹⁰⁾. A hipótese aventada para tal miopização baseia-se em princípio semelhante ao da CR, com o diferencial que a incisão do LASIK se dá de forma paralela ao plano da córnea, formando um disco central de epitélio e estroma superficial (flap). Pela hipóxia da altitude, o edema estromal que ocorreria neste disco, separado do restante do estroma por uma linha de incisão e cicatrização produzida na cirurgia, causaria aumento da curvatura corneana central (no flap corneano), levando à indução de miopia.

Conforme foi possível observar, o conhecimento dos aspectos físicos e da composição química da atmosfera é de grande importância para a compreensão da hipóxia da altitude. Esta pesquisa bibliográfica não esgota o assunto, servindo como fonte para desenvolvimento de novos trabalhos que possam contribuir, cada vez mais, para o fortalecimento da medicina aeroespacial como especialidade médica e aperfeiçoando os profissionais de saúde da aviação civil e militar.

ABSTRACT

This bibliographic review work is pointed to the effects of altitude hypoxia on sight. It intends to contribute for the identification of signs and symptoms of hypoxia during high altitude exposition. The understanding of the terrestrial atmosphere and the laws of physics related to gas behavior under atmospheric pressure variation are very important for the correct diagnosis of the dysbarisms, hypoxia, decompression disease and others, by the aerospace health professionals. The atmospheric environment that pilots are exposed is able to interfere in a significant way on visual function and can lead to reversible or irreversible lesions such as: retinal bleeding, decrease of the night vision and vision acuity, restriction of the visual field, emergence of latent strabismus, decrease of the intra-ocular pressure and refractive alterations in individuals that went through refractive surgery.

Keywords: Hypoxia, brain ; Decompression sickness; Aerospace medicine Altitude; Vision/physiology; Atmospheric pressure; Vision/physiology; Review

REFERÊNCIAS

1. Thomas JT, Douglas JI. Ophthalmology in aerospace medicine. In: DeHart RL, Davis JR. Fundamentals of aerospace medicine. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2002. p.362-88.
2. Temporal W. Medicina aeroespacial. Rio de Janeiro: Luzes; 2005.
3. Vingrys AJ, Garner LF. The effect of a moderate level of hypoxia on human color vision. *Doc Ophthalmol.* 1987;66(2):171-85.
4. Wilmer WH, Berens C Jr. Medical studies in aviation: V. The effect of altitude on ocular functions. 1918. *Aviat Space Environ Med.* 1989;60(10 Pt 1):1018-23.
5. Pavlidis M, Stupp T, Georgalas I, Georgiadou E, Moschos M, Thanos S. Intraocular pressure changes during high-altitude acclimatization. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* 2006;244(3):298-304.
6. Mader TH, White LJ. Refractive changes at extreme altitude after radial keratotomy. *Am J Ophthalmol.* 1995;119(6):733-7.
7. Winkle RK, Mader TH, Parmley VC, White LJ, Polse KA. The etiology of refractive changes at high altitude after radial keratotomy. Hypoxia versus hypobaria. *Ophthalmology.* 1998;105(2):282-6.
8. Ng JD, White LJ, Parmley VC, Hubickey W, Carter J, Mader TH. Effects of simulated high altitude on patients who have had radial keratotomy. *Ophthalmology.* 1996;103(3):452-7.
9. Mader TH, Blanton CL, Gilbert BN, Kubis KC, Schallhorn SC, White LJ, Parmley VC, Ng JD. Refractive changes during 72-hour exposure to high altitude after refractive surgery. *Ophthalmology.* 1996;103(8):1188-95.
10. Dimmig JW, Tabin G. The ascent of Mount Everest following laser in situ keratomileusis. *J Refract Surg.* 2003;19(1):48-51.