



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

**Influência da atmosfera terrestre na visibilidade  
Estudo da correlação entre dados  
atmosféricos e visibilidade**

**Manuel De Jesus Nascimento Neto**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Optometria em Ciências da visão**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Professora Doutora Sandra Mogo

Covilhã, 08 Julho de 2013

# Agradecimentos

Agradeço a todos os que me deram o seu apoio durante este percurso, especialmente aqueles que nos meus momentos de desespero e desmotivação estenderam-me a sua mão. A Sra. Professora Doutora Sandra Mogo, que muito me honrou com a sua orientação e apoio ao longo desta dissertação. À equipa de “Mozambique eyecare project”, pela persistência e a preocupação, foram eles que me deram orientação e me ajudaram a pesquisar a informação necessária para a conclusão desta dissertação.

Um obrigado especial à Professora Maria Lourenço, pelo apoio e entusiasmo, que muito me ajudou na correção e na leitura secundária não só nesta dissertação, como em outros trabalhos ao longo do ano.

Agradeço imenso à minha família, o meu pai, a minha mãe e irmã e, especialmente ao meu irmão, pelo apoio e respeito incondicional em todas as opções da minha vida.

Aos meus amigos em Moçambique pela força de vontade que me deram. Obrigada por todos os *e-mails* de apoio, especialmente nos últimos meses. Obrigada ao Eduardo, porque não me deixou desistir, e pelo reforço positivo. Aos meus amigos de Portugal, porque estão sempre cá. Sempre, e mais quando é necessário. Obrigado Eduardo, Ricardo, Nuno, Flor, Pedro, Sangalhos e Luís.

Quero também agradecer ao Pedro de Almeida e ao Gonçalo Nascimento desde o apoio psicológico, que muito conta, até ao apoio técnico/informático uma vez que foram eles que me ajudaram nas minhas dificuldades de manipulação dos programas informáticos.

Para terminar, um grande obrigado à Universidade da Beira Interior e a Universidade Lúrio por me terem dado esta oportunidade de aprender e desenvolver a minha capacidade profissional.

Manuel De Jesus Nascimento Neto

# Resumo

Na presente dissertação discute-se a interação entre partículas e gases na atmosfera com a radiação electromagnética, a luz. Enquanto a luz segue o seu caminho para a superfície da Terra ela interage com as partículas e os gases que compõem a atmosfera. Ao interagir com a atmosfera perde-se energia luminosa. Este fenómeno é chamado de extinção da luz o que resulta da combinação de dois fenómenos, absorção de luz e da difusão de luz. A extinção da luz é importante, devido ao facto de esta ser a causa da degradação da imagem, o que por sua vez tem um efeito negativo sobre a visibilidade.

O tema mais importante abordado neste trabalho é a correlação entre os coeficientes de extinção medidos e o seu efeito sobre a visibilidade. O objetivo principal é de compreender e analisar as causas de extinção da luz, a quantidade de luz extinta e os seus efeitos na visibilidade, comparando vários estudos.

Para atingir os objetivos estabelecidos esta dissertação foi estruturada e organizada como se segue; uma introdução ao tema da dissertação, um resumo da radiação eletromagnética e da atmosfera, onde todas as informações sobre a estrutura e organização do ambiente são fornecidas juntamente com a propagação natural da luz e a sua interação com a atmosfera circundante. De seguida termina o capítulo com a quantificação do coeficiente de extinção. O capítulo 2 descreve a neurofisiologia do olho humano e a percepção visual. O capítulo 3 descreve a visibilidade e as possíveis fontes naturais e antropogénicas que contribuem para a sua degradação. Este capítulo termina com a descrição de alguns exemplos de como a degradação da visibilidade pode afectar o dia a dia.

A atmosfera contém diferentes materiais originados a partir de fontes diferentes, cada uma com a sua única constituição, densidade, tamanho e concentração. Cada uma delas tem um impacto único na propagação da luz visível, que também terá um impacto sobre a sua própria visibilidade. Houve diversos estudos nesta área, pois a visibilidade é um parâmetro de grande interesse.

Algumas observações e sugestões foram deixadas para um estudo futuro que podem ser desenvolvidos para melhorar a técnica e os resultados.

Palavras-chave: visibilidade, coeficiente de extinção, difusão, absorção, reflexão; contraste; aerosol

# Abstract

The present dissertation discusses the interaction between atmospheric particles and gases with the electromagnetic radiation – light. While electromagnetic radiation follows a given route to the earth's surface it interacts with the atmospheres' constituting particles and gases causing the final luminous energy to differ from the starting luminous energy. This phenomenon is called light extinction, which results from two other phenomena's, light absorption and light scattering. Light extinction is important due to the fact that the extinguishing light from the route of propagation is the cause of image degradation, which in turn has a negative effect on visibility.

The most prominent topic addressed in this dissertation is the correlation between the extinction coefficient measurements and its effect on visibility. The main aim is to understand and analyze the causes for light extinction, how much light is being extinguished and how it affects visibility, by comparing information from similar studies.

In effort to accomplish the objectives established, the dissertation was structured and organized as follows; an introduction of the dissertations topic, a summary of Light and the atmosphere, where all information about the structure and organization of the atmosphere is provided along with the natural propagation of light and light interaction with its surrounding atmosphere. It ends on the quantification of the extinction coefficient. Chapter 2 approaches the description of visual perception and neurophysiology of the human eye, one of which (perception) can be influenced by weather conditions. Chapter 3 describes visibility and possible natural and anthropogenic sources for its impairment. Also, it describes a few examples of how visibility impairment affects our day to day lives.

The atmosphere contains different materials from different sources each with its unique constitution, density, size and concentration. Each of these has a unique impact on the propagation of visible light, that will also have a its own impact on visibility itself. There have been multiple studies in this area, because visibility is a parameter of great interest

Some comments and suggestions were left for a future study that may be developed to improve the technique and the results.

Key words: visibility; Extinction coeficiente; dispersion; absorption; reflection; contrast; aerosol.

# Índice geral

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract .....	iii
Índice geral .....	iv
Lista de figuras .....	v
Lista de tabelas.....	vii
Lista de acrónimos .....	viii
Lista de símbolos .....	x
Símbolos químicos .....	xi
Introdução.....	1
Capítulo 1 Luz e atmosfera .....	3
1. Origem da luz solar .....	3
2. Atmosfera.....	4
3. Propagação da luz solar e interação com a atmosfera.....	9
4. Quantificação da extinção de luz na atmosfera.....	15
Capítulo 2 Visão através da atmosfera.....	22
1. Sensibilidade espectral do olho humano.....	22
2. Acuidade visual e contraste.....	25
3. Fatores limitantes.....	30
Capítulo 3 Avisibilidade.....	32
1. Fontes significativas de limitação da visibilidade.....	35
1.1 Fontes naturais.....	35
1.2 H <sub>2</sub> O condensada.....	36
1.3 Poeira em movimento.....	37
1.4 Fogos florestais.....	38
1.5 Fontes naturais de aerossóis secundários.....	39
2. Alguns efeitos no dia a dia.....	40
3. Quantificação do coeficiente de extinção.....	42
Comentários finais e linhas futuras.....	46
Bibliografia.....	48

# Lista de figuras

Figura 1.1	- Perfil de temperatura atmosférica, com a localização próxima dos limites entre as camadas. Divisão atmosférica por altitude e consoante a sua temperatura.....	4
Figura 1.2	- Espectro da radiação solar no topo da atmosfera (curva superior) e ao nível do mar (curva inferior), para atmosfera média.....	8
Figura 1.3	- O espectro eletromagnético.....	9
Figura 1.4	- Onda sinusoidal representante da propagação de uma onda no espaço.....	10
Figura 1.5	- Localização do percurso da Terra à volta do Sol e as suas distâncias relativas denominados por periélio e afélio.....	10
Figura 1.6	- Propagação da luz proveniente do Sol até atingir a Terra nos meses de dezembro/janeiro.....	11
Figura 1.7	- Incidência de raios luminosos em vários c.d.o.....	12
Figura 1.8	- Efeito de reflexão e refração dos raios luminosos incidentes na superfície de separação entre dois meios com distintos índices de refração.....	12
Figura 1.9	- Incidência dos raios luminosos nas partículas atmosféricas.....	13
Figura 1.10	- Fenómeno de difusão de Rayleigh e MIE.....	13
Figura 1.11	- Efeitos da difusão de Rayleigh e resultados da teoria de MIE.....	14
Figura 1.12	- Espalhamento Rayleigh para o NO <sub>2</sub> e para o ar.....	17
Figura 1.13	- Difusão e absorção através de uma Partícula única.....	18
Figura 1.14	- Difusão de luz por várias partículas isoladas de substâncias diferentes.....	19
Figura 1.15	- Difusão de luz para uma distribuição típica de aerossol.....	20
Figura 2.1	- Distribuição dos fotorreceptores fotópicos e escotópicos consoante o ângulo em relação à fóvea.....	22
Figura 2.2	- Representação gráfica dos três picos de sensibilidade da visão fotópica.....	23
Figura 2.3	- Sensibilidade espectral fotópica.....	23
Figura 2.4	- Sensibilidade dos fotorreceptores retinianos: cones e bastonetes.....	24
Figura 2.5	- O limiar de deteção de contraste envolve a discriminação do campo de sinal (I) a partir do seu fundo brilhante (I + ΔI).....	26

Figura 2.6	-	Frequência de detecção de um teste padrão com frequência espacial variável.....	26
Figura 2.7	-	Sensibilidade ao contraste obtida para redes sinusoidais de três ciclos por grau correspondente a um limiar de contraste de 0,003 ou 0,3%.....	27
Figura 2.8	-	Escala de cinzentos.....	27
Figura 2.9	-	Comparação relativa de um objeto da mesma cor com fundos diferentes.....	28
Figura 2.10	(a)	Carta de Pelli-Robson para medição da SC; (b) Cartas de baixo e alto contraste; (c) Curva de SC para um observador normal .....	29
Figura 2.11	-	Efeito de distorção dos raios luminosos no olho humano.....	30
Figura 3.1	(a)	Representação esquemática da extinção atmosférica, ilustrando os feixes de luz: (i) transmitida, (ii) difundida, e (iii) absorvida. (b) Representação esquemática de visibilidade diurna, ilustrando: (i) a luz residual.....	33
Figura 3.2	-	Cidade de Nampula, Moçambique.....	35
Figura 3.3	-	Distribuição do volume de aerossóis de poeira recolhida durante uma grande tempestade de poeira em NW Texas em 18 de abril de 1975.....	38
Figura 3.4	(a)	Medidas de coeficiente de difusão de luz para pluma queima da floresta. (b) Trajetória de voo da aeronave.....	39
Figura 3.5	-	Limiar de contraste para alvo de Gabor por três observadores. A curva preta em cada gráfico representa as previsões de um observador padrão. As barras verticais representam um desvio padrão .....	41
Figura 3.6	-	Gráfico da variação da visibilidade num intervalo de 30 anos, na cidade de Dehli – India.....	42
Figura 3.7	-	Diagrama do equipamento de um transmissómetro.....	44
Figura 3.8	-	Diagrama do equipamento de um telefotómetro.....	44

# Lista de tabelas

Tabela 1-1	- Composição da atmosfera. Todos os valores apresentados correspondem a valores médios da troposfera.....	8
Tabela 3-1	- Resumo das técnicas utilizadas na quantificação do coeficiente de extinção.....	43

# Lista de Acrónimos

c.d.o	Comprimento de onda
EUA	Estados Unidos da América
FSC	Função de sensibilidade ao contraste
FSE	Função de sensibilidade espectral
MP	Material particulado
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ppbv	Part per billion by volume
ppbv	Part per billion by volume
PG	Partículas grossas
SC	Sensibilidade ao Contraste
TCAS	Traffic Collision Avoidance System
UVB	Ultravioleta Beta
UVC	Ultravioleta Curto
VMC	Condições Meteorológicas Visuais

# Lista de símbolos

$A$	Área
$C$	Contraste
$C_M$	Contraste de Michelson
$C_W$	Contraste de Weber
$C_0$	Constante de calibração
$C_x$	Contraste entre o objeto e o fundo na Lei de <i>Koschmieder</i>
$d$	Distancia
$E_v$	Iluminância (ou excitância)
$I$	Luz proveniente do horizonte
$I$	Intensidade do feixe incidente
$I_v$	Intensidade luminosa
$L_{max}$	Luminância máxima
$L_{min}$	Luminância mínima
$L_0$	Luminância inicial
$L_v$	Luminância
$L_x$	Luminância depois da luz atravessar a distância $x$
$n$	Índice de refração (parte real)
$Q$	Energia luminosa
$\mathcal{V}^\circ$	Visibilidade
$W$	Parâmetro de difusão do ambiente
$x$	Distância entre o fotodetector e o objeto
$\beta_R$	Difusão de Raileigh
$\lambda$	Comprimento de onda
$\sigma_a$	Coefficiente de absorção por partícula
$\sigma_e$	Coefficiente de extinção por partícula
$\sigma_{ext}$	Coefficiente de extinção por gases e partículas
$\sigma_{ag}$	Absorção por gases
$\sigma_{Rg}$	Difusão Rayleigh por moléculas
$\sigma_s$	Coefficiente difusão por partículas
$\phi_v$	Fluxo luminoso
$\Phi$	Fluxo Radiante
$\Omega$	Integração de todas as direcções da luz

# Símbolos químicos

C	Carbono
Ca	Cálcio
Cr	Crómio
D	Deutério
Fe	Ferro
H	Hidrogénio
He	Hélio
Ne	Néon
Ni	Níquel
n	Neutrão
O	Oxigénio
Si	Silício
So	Enxofre
T	Trítio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
H <sub>2</sub> O	Água
N <sub>2</sub>	Azoto molecular
NO <sub>2</sub>	Dióxido de azoto
O <sub>2</sub>	Oxigénio molecular
O <sub>3</sub>	Ozono
N <sub>2</sub>	Azoto molecular
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício

# Introdução

A visão é um dos principais sentidos da maioria dos seres humanos, permitindo ver o mundo que os rodeia e aprimorar a sua percepção deste. O órgão responsável pela visão é o olho, órgão muito complexo e sofisticado que faz parte de uma interpretação que nos permite visualizar tudo à nossa volta. Com a visão, podemos observar o mundo com diferentes perspectivas de acordo com aquilo que cada um está acostumado a ver, pois a visão não é apenas um instinto inato mas, sim, um sentido aprendido. Uma das áreas mais importantes da visão é a visibilidade. A capacidade de definir, monitorar, modelar e controlar o prejuízo antropogénico da visibilidade depende da compreensão científica e técnica disponível dos fatores que afetam a visibilidade atmosférica. Esta envolve a percepção humana do ambiente físico, avaliação dos efeitos da poluição do ar na visibilidade e deve incluir a especificação do processo da percepção visual humana, a quantificação dos impactos dos fenómenos naturais climatéricos e a poluição do ar sobre as características óticas da atmosfera.

A visibilidade atmosférica é definida como a maior distância a que um observador pode ver um objeto escuro tendo o céu como fundo, que na terminologia quantitativa é conhecido como o alcance visual. A degradação da visibilidade pode resultar da difusão e absorção de luz por partículas e gases atmosféricos, naturais ou de origem antropogénica, enquanto a descoloração atmosférica pode ser definida qualitativamente como uma mudança da poluição com consequências para a cor do céu, montanhas distantes, nuvens, ou outros objetos.

A cor do céu é um indicador de qualidade do ar no nosso campo visual. Este é acessível em terreno plano, sem obstáculos a bloquear a visão de longe. Num dia claro, quando as concentrações de partículas são baixas, o céu apresenta uma cor azul intensa. As partículas dispersam a luz solar que “dilui” as cores e, portanto, num dia obscuro, quando as concentrações de partículas são altas, o céu parece mais azul claro, branco ou acinzentado, dependendo da concentração. Os olhos auto-calibram-se por comparação da cor do céu, por exemplo, antes e depois de uma tempestade ou mesmo após um período seco os olhos acabam por se adaptar ao ambiente – fenómeno de adaptação. Uma vez sintonizados com as diferenças, os olhos são instrumentos eficazes para avaliar certos tipos de poluição do ar por partículas.

Os poluentes do ar podem ser divididos em duas classes: os gases e as partículas. As partículas são compostas por líquidos ou sólidos e são coletivamente referidos como material particulado (MP). A maioria dos poluentes gasosos são invisíveis para o olho humano, incluindo o ozono, dióxido de enxofre e o dióxido de carbono. As partículas individuais de MP são tão pequenas que são invisíveis (ou quase invisíveis) para o olho humano, mas coletivamente criam névoa. Os efeitos da névoa, constituída por poluentes de pequeno tamanho sobre a visibilidade, são semelhantes aos efeitos de nevoeiro

constituído por partículas de água. Como exemplos de MP temos o escape dos veículos com motor a gasóleo, o fumo das chaminés, e gotículas de ácido sulfúrico formado na atmosfera. Embora o MP pareça desaparecer à medida que se difunde na atmosfera, na realidade apenas fica mais diluído. No processo, as plumas de fontes individuais diferentes formam uma névoa uniforme e sem características específicas. O MP pode mesmo persistir na atmosfera por vários dias ou semanas e ser transportado milhares de quilómetros, afetando a visibilidade local, regional e global. Conceptualmente, qualquer tipo de deficiência de visibilidade poderia finalmente ser expressa como uma redução no alcance visual ou descoloração atmosférica. No entanto, porque estes efeitos são muitas vezes os resultados do mesmo impacto de contaminação, é útil para categorizar a insuficiência de visibilidade antropogénica em três tipos principais, a disseminação regional de névoa homogénea que reduz a visibilidade em todas as direções a partir de um observador, o fumo, pó ou plumas de gás coloridas que obscurecem o céu ou o horizonte relativamente próximo da fonte e as camadas de descoloração ou névoa que aparece acima do terreno circundante.

A visibilidade é um fator importante na vida quotidiana, especialmente na indústria da aviação e do trânsito terrestre. No entanto, é igualmente importante para os efeitos psicológicos e estéticos, turismo, preservação e vista da paisagem. A visibilidade é regularmente medida em estações sinóticas meteorológicas de todo o mundo como um parâmetro meteorológico padrão. Na ausência de certas condições climáticas (eg, nevoeiro e chuva), a visibilidade é um indicador da qualidade do ar como a sua deficiência pode ser facilmente reconhecida mesmo a olho nu. O tratamento da visibilidade exige uma descrição matemática da interação da luz com a atmosfera, esta descrição é baseada num balanço energético complexo como a descrição seguinte aborda qualitativamente este processo. A intensidade do feixe de luz em direção a um observador diminui com a distância a partir da fonte de luz pois esta pode ser absorvida ou difundida pelos gases e o MP.

Muitas vezes deixamos de reparar no nosso ambiente, mas consciente ou inconscientemente, todos somos afetados por ele. A vida mantém-nos maioritariamente focados, de forma intensa, no mundo moderno construído. A civilização do hemisfério norte passa a maioria do seu tempo dentro de casa, e muitas pessoas estão mais familiarizados com o ambiente de seu escritório do que o do seu bairro. Apesar da maioria de nós estar distraído *"there is not a moment of any day of our lives, when nature is not producing scene after scene, picture after picture, glory after glory"* (1). Pode ser angustiante e emocionante observar a natureza, mas mesmo quando não o fazemos, temos uma sensação de conforto pelo facto de os fenómenos naturais não deixarem de ocorrer.

Este trabalho encontra-se dividido em três capítulos, onde se apresentam em primeiro lugar as bases físicas que permitem compreender a interação da luz com a atmosfera. Seguidamente aborda-se a parte do processo visual e perceptivo que pode ser influenciado pelas condições atmosféricas e, finalmente, no último capítulo, aprofunda-se o conceito da visibilidade.

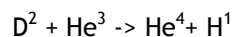
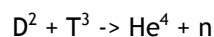
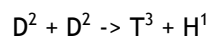
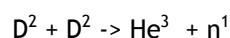
# Capítulo 1

## Luz e atmosfera

### 1. Origem da Luz Solar

O Sol é a estrela, no centro do sistema solar. É quase perfeitamente esférica e composta por plasma quente entrelaçado com campos magnéticos (2, 3). Tem um diâmetro aproximado de 1 392 000 km, cerca de 109 vezes maior que a Terra, e a sua massa constitui aproximadamente 99,8% da massa total do sistema solar (4). É constituído por muitos elementos químicos, que interagem entre si, como o hidrogénio, hélio, oxigénio, azoto, carbono, néon, ferro, silício, magnésio, enxofre entre outros. Esta interação é a principal fonte de energia irradiada pelo sistema solar, que por sua vez tem consequências diretas sobre a Terra. O Sol é constituído principalmente por hidrogénio com quantidades de 74,9% em massa e 92% em volume, de seguida encontra-se o hélio com 23,8% em massa e 7% em volume (5). Todos os elementos mais pesados, denominados conjuntamente em astronomia como metais, formam menos de 2% da massa solar. Os mais abundantes são o oxigénio (1% da massa do Sol), carbono (0,3%), néon (0,2%) e ferro (0,2%) (6). Obviamente existem outros elementos, em quantidades muito inferiores, tais como, níquel, silício, enxofre, cálcio e crómio (7).

A luz solar é produzida através de reações de fusão e fissão. Fusão é a reação entre dois núcleos leves e a fissão consiste na cisão de núcleos pesados. A principal reação de fusão que ocorre no interior do Sol verifica-se entre dois protões (núcleos de hidrogénio), o que liberta a energia com uma taxa extremamente lenta. Esta reação é consequência de uma alta geração de energia devido à existência de enorme quantidade de hidrogénio termicamente isolado no seu centro. Para aplicações em fusão, as reações mais importantes envolvem o deutério e o trítio, os isótopos mais pesados do hidrogénio, e o isótopo raro de hélio ( $\text{He}^3$ ).



Consequentemente, com a produção destes elementos maiores, ocorrem mais reações de fissão, o que por sua vez, tem uma grande influência na produção de energia sob a forma de radiação eletromagnética – a luz (7).

## 2. Atmosfera

O percurso da luz começa no Sol e atravessa todas as camadas da atmosfera terrestre. A atmosfera é constituída por várias camadas, cada uma delas com características específicas, pois não varia só em altitude como também noutras características físicas, como a temperatura, a constituição química, a concentração de partículas e elementos no seu meio, incluindo a quantidade de aerossóis<sup>1</sup> (8).

Pode considerar-se que a atmosfera se estende, desde o nível do mar, por cerca de 1000 km de altitude, em torno de todo o globo, sendo preenchida por gases neutros. Abaixo dos 50 km pode-se assumir que a atmosfera é homogeneamente misturada, podendo ser tratada como um gás perfeito. Acima dos 80 km de altitude existem duas alterações significativas, o equilíbrio hidrostático decompõe-se progressivamente com a difusão, e a influência do transporte vertical dos gases existentes na atmosfera torna-se relevante, devido ao aumento de temperatura a partir desta altitude (9).

A figura 1.1 representa sumariamente a estrutura da atmosfera através da diferenciação das camadas por diferentes temperaturas, nomeadamente a exosfera, termosfera, mesosfera, estratosfera e troposfera, do exterior para o interior. Estas cinco camadas, unidas, asseguram a vida na Terra.

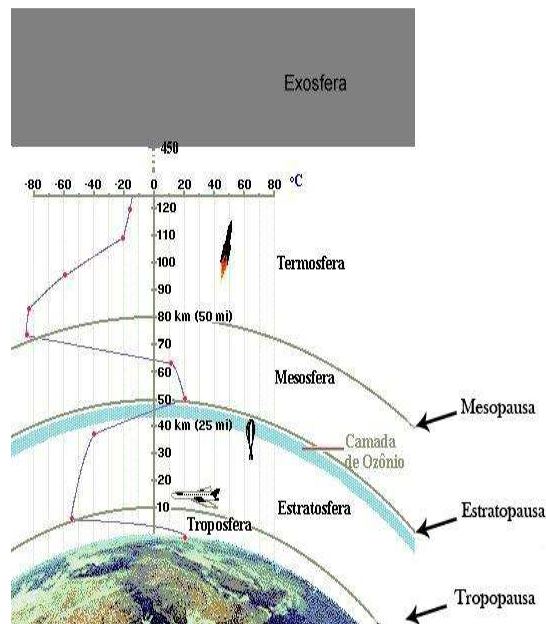


Figura 1.1 Perfil de temperatura atmosférica, com a localização próxima dos limites entre as camadas. Divisão atmosférica por altitude e consoante a sua temperatura (10).

Cada camada da atmosfera tem o seu conjunto de características que define e limita o intervalo determinado. A primeira camada por onde passa a radiação eletromagnética é a *exosfera*, caracterizada como a camada exterior que se estende dos 500 km até cerca de 1000 km de altitude,

<sup>1</sup> Aerossol: suspensão de partículas sólidas ou gotas de líquido num gás (11).

esta camada apresenta temperatura constante (12). Sendo a parte mais exterior da atmosfera terrestre, existe uma diluição de concentração de toda a matéria, uma vez que em alturas maiores para o espaço interplanetário se verifica um maior espaçamento entre as partículas. A 1000 km de altitude estima-se a densidade em apenas  $7,3 \times 10^5$  partículas  $\text{cm}^{-3}$ , em comparação com  $2,5 \times 10^{19}$  partículas  $\text{cm}^{-3}$  que se encontra ao nível do mar. Logo, com baixa densidade de partículas, as colisões são bastante raras (13), estando de tal modo afastadas que podem viajar centenas de quilómetros sem colidir umas com as outras. Estas partículas livres deslocam-se seguindo trajetórias balísticas, podendo migrar para dentro ou para fora da esfera magnética e do vento solar da atmosfera (14, 15). Esta é a camada mais quente da atmosfera, chegando a atingir uma temperatura de  $2000^\circ\text{C}$ .

A *termosfera* é referida, por alguns autores mais antigos, como a camada mais extensa da atmosfera, que se estende dos 80 km até aos 1000 km de altitude, englobando a exosfera como uma sub-camada, contudo neste trabalho optou-se por uma classificação mais recente, que entende que a termosfera se estende dos 80 km até aos 500 km, separando-a assim da exosfera (12). Nesta camada, a temperatura sobe com o aumento de altitude, desde a mesopausa<sup>2</sup> até ao limite superior a termopausa. Na termosfera a inversão da temperatura é o resultado da densidade de moléculas extremamente baixa, podendo atingir os  $1500^\circ\text{C}$ . Contudo, como as moléculas de gás estão muito afastadas, a temperatura geralmente não é bem definida, pois existe uma variação muito grande nas diferentes zonas. A temperatura termosférica aumenta com a altitude, devido à absorção de grandes quantidades de energia proveniente da radiação solar pelo oxigénio residual presente. Mesmo com temperaturas elevadas, não se sente o calor na termosfera, devido ao facto de as características desta camada serem semelhantes às do vácuo, logo não existe contacto suficiente com os átomos de alguns gases para transferir muito calor. O ar na termosfera é tão rarefeito que uma molécula individual de oxigénio pode viajar em média 1 km para colidir com outra molécula (16). Na termosfera os dois componentes dominantes são o oxigénio molecular ( $\text{O}_2$ ) e o azoto ( $\text{N}_2$ ) (17).

A luz proveniente do Sol, depois de atravessar a termosfera, passa pela mesopausa e entra na camada designada *mesosfera*. A mesosfera é a camada que está localizada acima da estratosfera e abaixo da termosfera, entre os 50 e os 80 km de altitude. Esta é a camada mais fria da atmosfera, onde a temperatura tende a diminuir com o aumento da altitude, podendo chegar aos  $-100^\circ\text{C}$  aos 80 km de altitude. Esta diminuição de temperatura é devida à diminuição do aquecimento solar, porque a radiação solar é mais fraca e o aumento de arrefecimento por emissão de  $\text{CO}_2$ . Milhões de meteoritos entram na atmosfera terrestre (em média 40 toneladas por ano) e é na camada da mesosfera que derretem ou são vaporizados, resultando numa concentração mais elevada de ferro e de outros materiais refratários que atingem a superfície (18).

---

<sup>2</sup> A mesopausa é o limite superior da mesosfera e o limite inferior da termosfera.

De seguida temos a *estratosfera* que se situa entre a mesosfera e a troposfera (figura 1.1). A estratosfera encontra-se entre os 10 e os 50 km de altitude. Está separada da mesosfera pela estratopausa e a porção inferior da estratosfera é quase isotérmica, enquanto a temperatura nos seus níveis superiores é mais elevada devido ao aumento da altitude. O limite inferior da estratosfera é designado por tropopausa, e encontra-se por volta dos 10 km de altitude, enquanto a estratopausa se encontra a 50 km de altitude. A estratosfera contém a camada de ozono. Aqui a temperatura aumenta de -60 para 0°C, devido ao aumento da interação química e térmica entre a radiação solar e os gases existentes na camada, sendo uma das suas propriedades mais importantes a absorção dos raios ultravioletas (19). Define-se a estratosfera maioritariamente pela temperatura, porque aqui o ozono (O<sub>3</sub>), que se divide em oxigénio elementar (O) e oxigénio molecular (O<sub>2</sub>), absorve os raios UVB e UVC de alta energia do Sol. São estas duas formas de recombinação de oxigénio na formação da camada do ozono, que libertam o calor encontrado na estratosfera. A presença da camada de ozono é fundamental para a vida na Terra, pois absorve a radiação ultravioleta na entrada. Como resultado, a estratosfera aquece e tem um gradiente de temperatura positivo. Os picos de temperatura na estratopausa localizam-se aproximadamente a 50 km de altitude (20).

Por fim temos a *troposfera*. Esta é a camada da atmosfera mais próxima da superfície terrestre e contém o ar que os seres vivos respiram. Esta camada está limitada verticalmente entre 0 a 10 km. Uma inversão de temperatura pode ser detetada na fronteira entre a troposfera e a estratosfera. Isto é, na troposfera à medida que a altitude aumenta a temperatura diminui até chegar à tropopausa, a partir do momento em que se chega a esta zona o efeito é o inverso, pois a temperatura aumenta à medida que se desloca radialmente para o exterior do globo (21). A estrutura atmosférica térmica é definida por uma combinação de processos de transferências dinâmicas e por radiação. A troposfera é aquecida a partir do solo, que absorve a radiação solar e liberta calor sob a forma de energia infravermelha. Logo, a temperatura do ar nesta região diminui linearmente com a altitude, a uma taxa de 5 a 7 K km<sup>-1</sup>, ou um pouco mais de metade de um grau por cada 100 m.

A palavra troposfera significa "esfera giradora", que simboliza o facto de que, nesta região, os processos convectivos<sup>3</sup> dominam os processos radiativos<sup>4</sup>. A troposfera é, de facto, marcada por forte convecção, em que grandes parcelas de ar quente viajam até à tropopausa, arrastando assim o vapor de água, formando nuvens à medida que a temperatura diminui. A troposfera contém a maior parte do vapor de água atmosférico, a maioria de nuvens e a maior instabilidade meteorológica, tanto a nível global como a nível local. A pressão diminui exponencialmente com a altitude, contendo aproximadamente 80% da massa total da atmosfera e 99% do seu vapor de água e aerossóis (22). A parte mais baixa da troposfera, onde a fricção com a superfície da Terra influencia o fluxo de ar, é a

---

<sup>3</sup> A convecção é o processo de movimento de moléculas em fluidos e gases (23).

<sup>4</sup> Os processos radiativos consistem na troca de energia que pode ser quantificada a partir das irradiâncias solar direta, global e difusa, para determinar o balanço global de energia.

camada limite planetária. Esta camada apresenta uma altitude entre os 2 km e as centenas de metros, dependendo do relevo da superfície terrestre e da hora do dia. Pelo facto de esta camada se encontrar em contacto com a superfície da Terra, interage diretamente com outros subsistemas, tais como a biosfera, a hidrosfera, a criosfera, e principalmente com o mundo humano (24).

Para além da caracterização das camadas atmosféricas existe um limite conhecido por *turbopausa*. Este limite marca a altitude na atmosfera abaixo da qual a mistura turbulenta domina. Na região inferior da turbopausa, conhecida como homosfera, os constituintes químicos encontram-se bem misturados e exibem distribuições idênticas, ou seja, a composição química da atmosfera permanece constante na região para as espécies químicas de longa permanência. Produtos químicos altamente reativos tendem a apresentar grande variabilidade de concentração por toda a atmosfera, enquanto as espécies não reativas apresentam concentrações mais homogêneas. A região acima da turbopausa é a heterosfera, onde a difusão molecular domina a composição química (25). A turbopausa encontra-se perto da mesopausa, na interseção entre a mesosfera e a termosfera, a uma altitude aproximada de 100 km. Acima da turbopausa, existe uma separação significativa por difusão dos vários constituintes, de modo que cada componente se situa a uma altura de escala inversamente proporcional ao seu peso molecular, ou seja, quanto mais leve a molécula, mais alta está. Os constituintes atômicos como o oxigénio, o hélio e o hidrogénio, dominam as altitudes, de forma sucessiva, acima dos 200 km e variam de acordo com a localização geográfica, o tempo e a atividade solar (17).

A atmosfera contém muitos componentes, desde vapor de água até poluentes artificiais humanos. A maior parte do ar seco atmosférico (ar com pouca quantidade de vapor de água suspenso) é constituída por azoto (78%) e oxigénio (21%). Gases nobres, dióxido de carbono e um grande número de outros gases em quantidade inferior constituem o restante 1% da atmosfera. Apesar de serem concentrações muito pequenas, estes constituintes vestigiais desempenham um papel vital em todos os aspetos da física e da química atmosférica (26). A tabela 1 faz referência à abundância média de um número selecionado de espécies, na troposfera. São estes os constituintes atmosféricos com maior influência na propagação da luz, que por sua vez terão maior influência na visão normal. A maioria dos constituintes está distribuída de forma bastante equilibrada até à mesopausa, com exceção do vapor de água, que se encontra principalmente confinado à troposfera e à camada de ozono.

Tabela 1-1 A composição da atmosfera (adaptado de 27). Todos os valores apresentados correspondem a valores médios da troposfera.

Constituinte	Rácio de mistura troposférica
N <sub>2</sub> (Azoto)	78.08%
O <sub>2</sub> (Oxigénio)	20.95%
H <sub>2</sub> O (Vapor de Agua)	<3.00%
Ar (Árgon)	0.93%
CO <sub>2</sub> (dióxido de carbon)	345 ppmv <sup>5</sup>
O <sub>3</sub> (Ozono)	10 ppmv
CH <sub>4</sub> (Metano)	1.6 ppmv
N <sub>2</sub> O (Óxido nítrico)	350 ppbv <sup>6</sup>
CO (Monóxido de carbon)	70 ppbv
CFC's	[0.2-0.31] ppbv

Na figura 1.2, a curva superior representa a quantidade de radiação presente na superfície superior das nuvens, comparativamente com a distribuição da quantidade de radiação existente à superfície da Terra, representada pela curva inferior. A área não sombreada, que se encontra entre estas duas curvas, representa a diminuição da luz que atinge a superfície terrestre devido à retro-difusão e absorção das nuvens e dos aerossóis, enquanto a área sombreada representa a absorção por moléculas do ar (28).

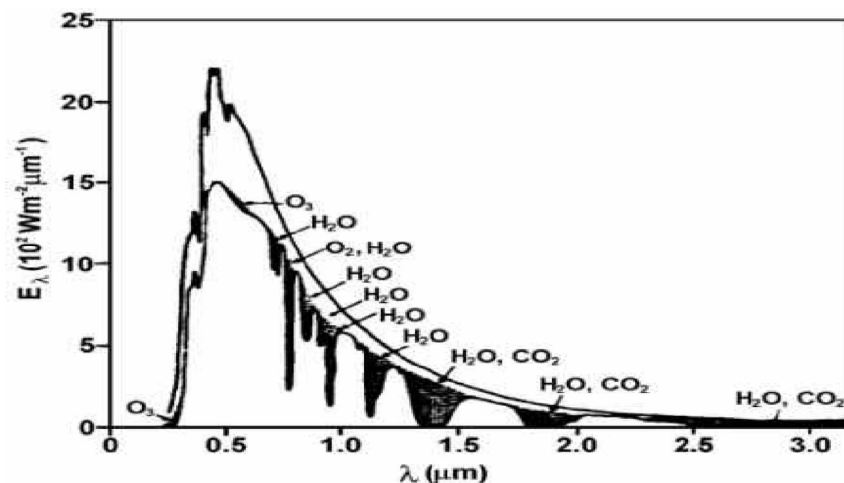


Figura 1.2 espectro da radiação solar no topo da atmosfera (curva superior) e ao nível do mar (curva inferior), para atmosfera média (28).

<sup>5</sup> ppmv - parte por milhão em volume.

<sup>6</sup> ppbv - parte por bilião em volume.

As distintas camadas atmosféricas, mantidas pela força gravítica, são essenciais na proteção da vida na terra. As camadas servem como barreiras de proteção, pois absorvem a radiação solar ultravioleta, aquecem a superfície por meio de retenção de calor, também designado por efeito de estufa, e reduzem a flutuação de temperaturas extremas do dia para a noite. Isto, para além do controlo de temperatura diurna. A atmosfera também tem a importante função de retenção de oxigénio, fundamental para a sobrevivência dos seres vivos (29).

De certo modo, todas as camadas terão a sua influência na propagação da luz, pois ocorrem fenómenos óticos que alteram a propagação dos fótons emitidos, os que foram alterados voltarão a ser alterados sucessivamente à medida que percorrem o longo caminho até à superfície do planeta. Neste trabalho procura-se perceber a interação da atmosfera, como um todo, na visão. Obviamente, a maior influência na visão é esperada da troposfera, uma vez que é a camada que faz fronteira com a Terra e dada a constituição desta camada terá as características mais influentes na alteração da propagação dos raios luminosos.

### 3. Propagação da luz solar e interação com a atmosfera

O espectro eletromagnético completo (figura 1.3), inclui ondas de rádio, micro-ondas, radiação infravermelha, espectro visível (que se estende do vermelho até ao violeta), radiação ultravioleta, raios-x e gama. Além disso, através da compreensão da teoria quântica da luz estudada por Planck, Einstein e Bohr durante as duas primeiras décadas do século XX, sabemos que a energia eletromagnética é quantificada, ou seja, pode ser dada ou retirada de um campo eletromagnético em quantidades discretas denominadas fótons (30).

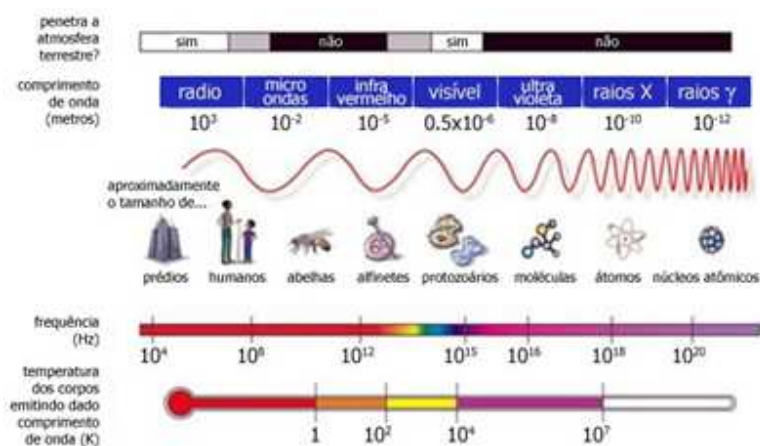


Figura 1.3 O espectro eletromagnético (adaptado de (31))

A figura 1.3 mostra as relações entre o tipo de onda e a respetiva frequência e c.d.o.. Os fótons estão constantemente em movimento e no vácuo, movimentam-se com velocidade constante, a velocidade da luz,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$  (30). O tempo que a luz demora a chegar à superfície terrestre,

atravessando as várias camadas da nossa atmosfera é de aproximadamente 8 min e 18 s (32). Existe uma dualidade na teoria de propagação que é universalmente aceita hoje em dia, pois por vezes a luz age como se fosse uma partícula e outras vezes age como se fosse uma onda. A propagação de partículas considera um feixe de luz como um fluxo de fótons, pequenas partículas sem massa e com energia que provoca movimento e que viaja a altas velocidades. Em linguagem de onda, um feixe de luz é uma série de ondas que estão em mudança constante de campo provocado por forças elétricas e magnéticas. Estas têm como características principais fase, amplitude e c.d.o. e, tal como as partículas, viajam a altas velocidades (33). Podemos descrever a propagação como uma função sinusoidal, que tem um limite apenas no seu ponto de contacto com uma superfície refletora, transmissora ou absorvente. A figura 1.4 representa algumas características já mencionadas como a amplitude e o c.d.o..

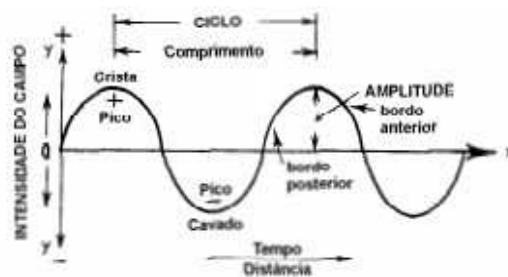


Figura 1.4 Onda sinusoidal representante da propagação de uma onda no espaço

Considerando que a distância entre a Terra e o Sol varia durante todo o ano, para além de uma implicação nas alterações climáticas, podemos concluir que toda a luz emitida pelo Sol terá uma influência diferente na sua propagação até chegar à Terra, em diferentes instantes, pois na atmosfera terrestre as condições físicas não são sempre iguais, logo os efeitos na propagação não serão sempre iguais (34).

O Sol encontra-se a uma distância média de 150 000 000 km da Terra. Esta distância varia com a posição da Terra na sua órbita à volta do Sol, desde um mínimo de 147 100 000 km no periélio (por volta do dia 4 de janeiro) até um máximo (próximo do dia 4 de julho) de 152 100 000 km no afélio (figura 1.5) (35).

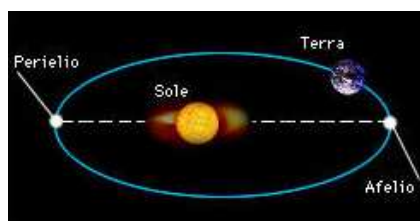


Figura 1.5 Localização do percurso da Terra à volta do Sol e as suas distâncias relativas denominados por periélio e afélio.

Após a libertação da energia pelo Sol, ela propaga-se radialmente em todas as direções, tal como uma fonte de luz pontual, incluindo na direção da Terra (figura 1.6). Atravessa as várias camadas existentes na atmosfera, até atingir a superfície terrestre onde é absorvida, refletida ou transmitida (36).

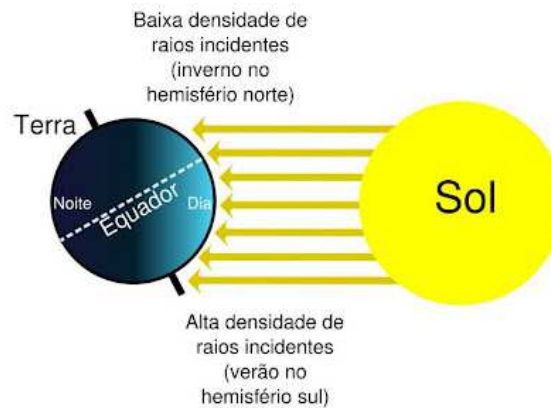


Figura 1.6 Propagação da luz proveniente do Sol até atingir a Terra nos meses de dezembro/janeiro.

Dado que a luz visível terá maior influência na visão procura-se saber mais sobre o que são os fenômenos físicos que alteram a propagação destas ondas de luz sob a forma de fótons e quais são os efeitos implícitos destas alterações na visibilidade.

As medidas da quantidade de luz são determinantes nos estudos da visibilidade, pois esta informação será útil para uma posterior análise de quanto a visão é afetada por influência da luz existente. A fotometria é o ramo da ótica que se preocupa em quantificar a luz em termos de percepção do brilho através do olho humano, pois este não é igualmente sensível a todos os c.d.o. que formam o espectro visível. A fotometria introduz este facto através da avaliação das diferentes medidas radiométricas para cada c.d.o. por um fator que representa a sensibilidade do olho para esse mesmo c.d.o – função de sensibilidade espectral (FSE).

Quando uma onda de luz com uma única frequência atinge um objeto de dimensões muito maiores que o seu c.d.o., podem ocorrer diversos tipos de acontecimentos, tais como (a) a onda de luz pode ser absorvida pelo objeto no caso de a sua energia ser convertida em calor; (b) a onda de luz pode ser refletida pelo objeto; (c) a onda de luz pode ser transmitida pelo objeto. A figura 1.7 representa a incidência normal dos raios luminosos num objeto que constitui um obstáculo na sua trajetória. Porém é muito raro apenas um c.d.o. num feixe de luz incidir num objeto, o mais comum é uma luz visível de muitas frequências incidir na superfície dos objetos. Quando isto ocorre, os objetos têm tendência para absorver, refletir ou transmitir determinadas frequências de luz de forma muito seletiva. Ou seja, um objeto pode refletir a luz verde, absorvendo todas as outras frequências da luz visível. Outro objeto pode, de forma seletiva, transmitir a luz azul, absorvendo todas as outras

frequências da luz visível. A maneira pela qual a luz visível interage com um objeto depende da frequência da luz e da natureza dos átomos do objeto (36).

Como apresentado na figura 1.7, a luz quando passa por um meio pode ser refletida, absorvida ou transmitida. Os fenômenos transmissão e reflexão alteram simplesmente a direção de propagação da luz, enquanto a absorção é responsável pela conversão de energia eletromagnética em energia térmica. No caso de o meio ser atmosfera terrestre, a quantidade total de radiação solar que atinge a Terra não depende apenas da duração do dia mas também da altura do Sol (37).

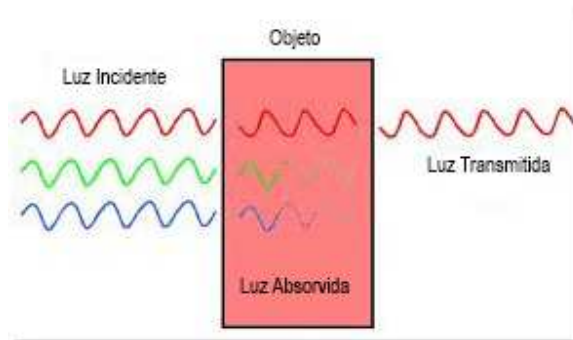


Figura 1.7 Incidência de raios luminosos em vários c.d.o..

A reflexão da luz pode ser especular ou difusa, dependendo da natureza da interface. Fala-se de *reflexão especular* quando uma imagem é obtida por efeito de espelho, ou seja, a luz incide numa superfície ou objeto e é refletida mantendo as suas características. Fala-se de *reflexão difusa* quando se retém a energia da luz incidente mas se perde a imagem inicial (36, 38).

A *refração* da luz ocorre quando a luz se propaga a partir de um meio, com um determinado índice de refração, para um meio com um índice de refração distinto. No caso mais geral, uma fração da luz é refletida a partir da interface, e a restante é refratada (39). A figura 1.8 representa estes dois fenômenos explicados acima.

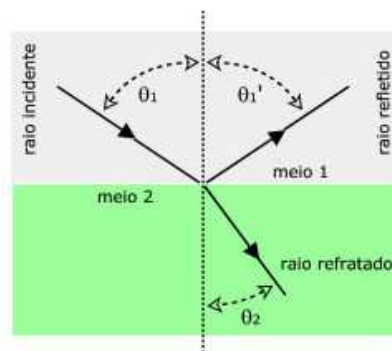


Figura 1.8 Efeito de reflexão e refração dos raios luminosos incidentes na superfície de separação entre dois meios com distintos índices de refração.

Alguns fenômenos óticos que ocorrem na atmosfera decorrem da interação da luz do Sol ou mesmo a luz solar refletida pela Lua, com as partículas suspensas, tais como, conjuntos de nuvens, poeira, água e restantes partículas nelas existentes, sejam naturais ou artificiais.

A dispersão é um fenômeno onde ocorre a separação da luz em diferentes comprimentos de onda. Os meios com tal propriedade são denominados meios dispersivos. A dispersão pode ser designada por *dispersão cromática* para enfatizar a sua natureza de dependência de comprimentos de onda (40).

O fenômeno de *difusão*, representado na figura 1.9, é um processo físico onde a luz é obrigada a desviar-se de uma trajetória linear em uma ou mais direções não uniformizadas dentro do meio, através do qual elas se deslocam (41), como por exemplo irregularidades no meio de propagação, partículas suspensas e nuvens entre outros.



Figura 1.9 Incidência dos raios luminosos nas partículas atmosféricas.

A *difusão de Rayleigh* (ou espalhamento de Raileigh) é um tipo de espalhamento de luz que se pode considerar importante na propagação da luz na atmosfera terrestre. Esta aplica-se às partículas que são pequenas em relação aos comprimentos de onda de luz incidentes (figura 1.10).

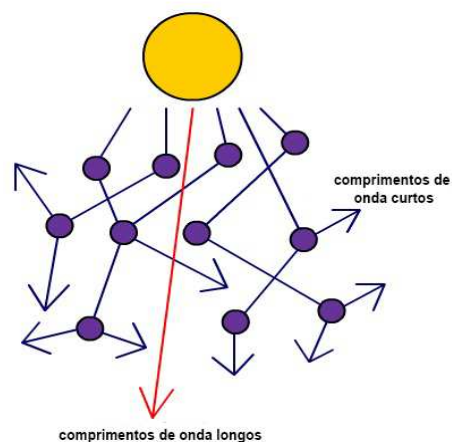


Figura 1.10 Fenômeno de difusão de Rayleigh e MIE.

O espalhamento de Rayleigh refere-se ao modelo de espalhamento atmosférico provocado por moléculas de ar limpo. O coeficiente de difusão angular de volume, ou função de fase, descreve a quantidade de luz difundida de um determinado c.d.o., numa determinada direção (40). Este fenómeno ocorre quando a luz atravessa partículas sólidas, líquidas transparentes e mais frequentemente partículas gasosas, o que justifica a cor azul do céu e a cor alaranjada deste ao entardecer. Para além da quantificação do espalhamento da luz, o modelo de Rayleigh também permite calcular a intensidade de um raio de luz difundida (42).

O grau da difusão de Rayleigh depende do tamanho das partículas que interferem na radiação e do c.d.o. da luz. Assim, se o tamanho das partículas for superior ao do c.d.o. da luz, esta luz não se decompõe nos seus componentes cromáticos e será difundida como uma luz branca, como acontece quando uma nuvem interfere nos raios de sol. Este fenómeno é melhor explicado pela teoria de Mie (42).

A teoria da *difusão de Mie* é uma teoria geral que se pode aplicar ao fenómeno de espalhamento provocado por partículas de qualquer tamanho. É utilizada predominantemente para descrever o espalhamento causado por partículas atmosféricas (naturais ou artificiais) com tamanhos iguais ou superiores ao c.d.o. da luz difundida. A teoria de difusão de Rayleigh é uma subteoria da teoria de Mie, que apenas explica a difusão causada por partículas menores que o c.d.o. da luz. Consequentemente, a difusão de Mie terá os mesmos resultados que a difusão de Rayleigh, ao medir a quantidade de luz espalhada em partículas com tamanhos inferiores ao c.d.o. da luz (43).

Abaixo encontra-se uma imagem ilustrativa da difusão através partículas de tamanho superior ao c.d.o. e partículas de tamanho inferior ao comprimento de onda da luz incidente (figura 1.11).

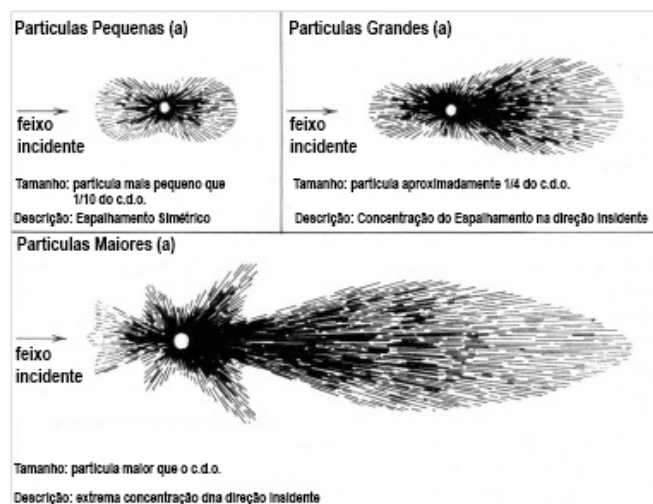


Figura 1.11 Efeitos da difusão de Rayleigh e resultados da teoria de Mie.

O espalhamento de luz por partículas coloidais<sup>7</sup> ou partículas em suspensão fina é também conhecido por *efeito de Tyndall*. A luz de c.d.o. maior é transmitida enquanto a luz de c.d.o. menor é refletida através de espalhamento da luz. Uma analogia a essa dependência de c.d.o. é a de que as ondas eletromagnéticas de elevado c.d.o., como as ondas de rádio, são capazes de passar através das paredes dos edifícios, enquanto as ondas eletromagnéticas de ondas curtas, como as ondas de luz, são paradas e refletidas pelas paredes. O efeito de Tyndall tem algumas semelhanças com a difusão de Rayleigh, uma vez que ambos provocam o espalhamento de luz por partículas muito pequenas. A difusão de Rayleigh exige que as partículas sejam muito menores do que o c.d.o. da luz enquanto partículas coloidais são maiores e estão na vizinhança aproximada do tamanho do c.d.o. de luz. Os resultados do efeito de Tyndall demonstram que a difusão (por partículas coloidais) é muito mais intensa do que a dispersão de Rayleigh (partículas de tamanho inferior). Para obter uma difusão de partículas, e se poder utilizar a fórmula de Rayleigh, as dimensões das partículas têm de ser inferiores a 40 nm, podendo as partículas ser moléculas individuais. O efeito de Tyndall é utilizado comercialmente para determinar o tamanho e a densidade de partículas em aerossóis e matéria coloidal (44). O efeito de Tyndall justifica a razão pela qual o fumo proveniente do tubo de escape de uma motorizada, do ponto de vista humano aparenta ter uma cor azulada.

#### 4. Quantificação da extinção de luz na atmosfera

Com a evolução da raça humana, as respectivas necessidades pessoais e profissionais também aumentaram. Queriam ser cada vez mais rápidos, mais resistentes, mais eficientes nas capacidades mais fundamentais, por outras palavras, queriam ser mais eficientes nos sentidos: a audição, o olfato, o tato, o paladar e a visão. Sendo assim, a tendência humana de evolução deu lugar à necessidade de estudar todas essas áreas com o objetivo de as aperfeiçoar. Esta tendência natural levou a raça humana a investigar áreas como visibilidade, a capacidade auditiva, o olfato mais aperfeiçoado em variadas condições de clima, tanto natural como artificial, de modo a tentar rentabilizar ao máximo essas capacidades.

Com o desenvolvimento do mundo tecnológico, foram criadas novas profissões com necessidades visuais superiores, exemplo disso, é a profissão de piloto, onde é necessária uma acuidade visual mínima obrigatória, ou seja, uma visão bastante nítida para poder reagir de modo adequado às diferentes condições que se pode enfrentar, uma vez que nem sempre existirão as condições climatéricas perfeitas. Pois, para além da necessidade de uma boa acuidade visual as condições de luminosidade do meio envolvente vão interferir diretamente com a eficiência do olho humano, uma vez que o olho é mais ou menos sensível, consoante o c.d.o. e a intensidade da luz que o atinge (45). Para uniformização da atuação em diferentes situações foi necessário avaliar a capacidade

---

<sup>7</sup> Uma suspensão coloidal é uma mistura heterogénea de partículas sólidas, não suficientemente grandes para a sedimentação. Normalmente, estas partículas devem ser menores do que 1 µm.

visual nessas situações e para tal tornou-se necessário um método de medição. O método encontrado serviu para quantificar a atenuação de luz que se propaga na nossa atmosfera, denominado por extinção (coeficiente de extinção,  $\sigma_{ext}$ ). Pois como já referido, a luz ao propagar-se na atmosfera sofre alterações devidas aos diversos fenômenos óticos explicados da secção anterior. Normalmente estas alterações implicam uma perda gradual da intensidade (46, 47).

Torna-se então necessário quantificar as grandezas fotométricas fundamentais, tal como o fluxo luminoso,  $\Phi_V$ , que determina a taxa de transferência da energia luminosa,  $\Phi_V = dQ/dt$  medida em lúmen [lm]. A iluminância é a quantidade de fluxo recebido ou emitido por uma dada superfície,  $E_V = d\Phi_V/dA$ , em que a unidade de grandeza é o lux [lux]. A intensidade luminosa é a quantidade de fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido,  $I_V = d\Phi_V/d\Omega$ , e é expresso em candela [cd]. Por fim, temos a luminância que representa o fluxo luminoso por unidade de área normal e por unidade de ângulo sólido,  $L_V = \frac{d^2\Phi_V}{d\Omega dA \cos(\theta)}$ , este tem a unidade  $cd \cdot m^{-2}$  ou nit (nit).

Conhecida a luminância é possível determinar a atenuação da radiação solar, que é descrita pela lei de Lambert - Beer, equação (1), ao atravessar uma determinada distância na atmosfera:

$$L_x = \frac{d^2\Phi_V}{d\Omega dA \cos(\theta)}, \quad (1)$$

onde  $L_x$  é a luminância calculada após a distância  $x$ ,  $L_0$  é a luminância na posição inicial e se representa o coeficiente de extinção da luz. O coeficiente de extinção da luz, equação (2), é um parâmetro que permite quantificar a atenuação da luz na atmosfera e representa uma soma do efeito dos gases e partículas.

$$\sigma_{ext} = \sigma_{Rg} + \sigma_{ag} + \sigma_s + \sigma_a, \quad (2)$$

onde  $\sigma_{Rg}$  é o espalhamento Rayleigh por moléculas de ar,  $\sigma_{ag}$  é a absorção por gases,  $\sigma_s$  é o espalhamento por partículas e  $\sigma_a$  é a absorção por partículas. Cada uma dessas variáveis depende do comprimento de onda, ou seja, da cor da luz incidente. As unidades do coeficiente extinção são de distância inversa,  $m^{-1}$ . As unidades mais utilizadas são  $km^{-1}$  e  $Mm^{-1}$ . A alteração da percepção dos objetos distantes relacionada com a poluição do ar (redução aparente de contraste e o alcance visual) depende do coeficiente de extinção. Com o aumento da extinção, a visibilidade diminui (48).

Apesar de a atmosfera ser relativamente transparente para a radiação solar, apenas cerca de 25% da radiação solar penetra diretamente na superfície da Terra, sem interferência da atmosfera. A restante é refletida para o espaço, absorvida ou espalhada ao redor da superfície da Terra até a atingir novamente ao espaço (49). O que acontece aos raios luminosos depende, maioritariamente, do tamanho e natureza do material e do c.d.o. incidente (49).

O espalhamento Rayleigh diminui consoante o comprimento de onda elevado à quarta potência, ou seja, o comprimento de onda é um componente que contribui fortemente para o coeficiente de extinção. A atmosfera molecular livre de partículas soltas, ao nível do mar, tem um coeficiente de extinção de cerca de  $0,012 \text{ km}^{-1}$  para a luz verde (500 nm), limitando o alcance visual por volta de 320 km. O  $\sigma_{Rg}$  diminui com a densidade do ar e a altitude (50). A difusão de Rayleigh resume-se a uma medição do nível de extinção de fundo em comparação com outros componentes de extinção, como no caso dos poluentes sintéticos. Quando a difusão de Rayleigh é dominante, os objetos escuros vistos a vários quilómetros, aparecem por detrás de uma névoa azul de luz difundida, e os objetos brilhantes no horizonte (como a neve, as nuvens ou o sol) adotam uma cor mais avermelhada em distâncias superiores a aproximadamente 30 km (48).

Entre todos os poluentes gasosos, apenas o dióxido de azoto ( $\text{NO}_2$ ) possui uma banda de absorção significativa, no intervalo do espectro visível. O  $\text{NO}_2$  e o seu precursor, o óxido nítrico, são emitidos por processos de alta temperatura, tais como a combustão nas plataformas de transformação de energia de combustível fóssil. O  $\text{NO}_2$  absorve fortemente o azul e pode colorir plumas de vermelho, castanho ou amarelo. A tonalidade e intensidade da cor dependem da concentração, do percurso ótico, das propriedades dos aerossóis presentes, das condições de iluminação e dos parâmetros do observador. Na figura 1.12 A extinção devida a  $\text{NO}_2$  em áreas urbanas com uma concentração de 0.1 ppm é comparada com a extinção espectral de ar puro. O coeficiente de extinção cai rapidamente com o comprimentos de onda, podendo originar uma cor acastanhada quando vista contra um fundo branco. No entanto, em concentrações com menos de 0,01 ppm, a absorção de  $\text{NO}_2$  não é relevante.

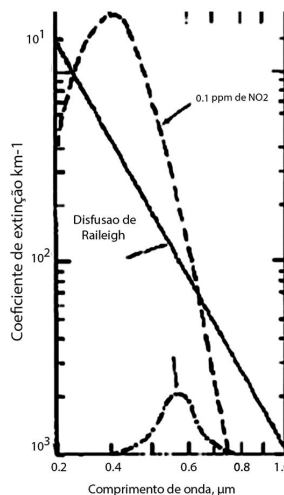


Figura 1.12 Espalhamento Rayleigh para o  $\text{NO}_2$  e para o ar. A densidade do ar, reduzida em altitudes mais elevadas, provoca uma redução da  $\sigma_{Rg}$ . O pico da extinção do  $\text{NO}_2$  esta por volta de 400 nm, em contrapartida a extinção é zero nos comprimentos de onda correspondentes a luz vermelha (51).

À medida que a concentração de partículas aumenta, de níveis muito baixos (onde a difusão de Rayleigh domina), o coeficiente de difusão de partículas ( $\sigma_s$ ) também aumenta até que finalmente  $\sigma_s > \sigma_{RG}$ . Neste ponto, a difusão através das partículas controla a qualidade visual do ar.

A difusão e a absorção da luz por partículas simples são definidas pelo tamanho e forma das partículas, bem como pelo seu índice de refração. Estes são os parâmetros mais importantes quando relacionamos a concentração relativa de partículas e os coeficientes de extinção de partículas,  $\sigma_s$  e  $\sigma_a$ . Tendo estas propriedades estabelecidas, pode-se calcular a difusão e a absorção (48).

As partículas atmosféricas ou aerossóis são compostos por um número considerável de elementos químicos. Todos estes elementos apresentam um pico de eficiência de difusão, em partículas do mesmo tamanho (figura 1.13). Os valores dos picos de difusão consoante o tamanho de partícula variam consideravelmente entre os compostos devido às diferenças de índice de refração (50).

A teoria de Mie, referida na secção 3, pode ser utilizada para calcular a difusão e a absorção da luz, por unidade de volume de partículas de um aerossol típico. Como ilustrado na figura 1.13 as partículas na gama de tamanhos de 0,1 a 1  $\mu\text{m}$  são os difusores de luz mais eficientes. A alta eficiência de difusão destas partículas é ilustrada por uma dada massa de aerossóis de 0,5  $\mu\text{m}$  de diâmetro que espalha a luz mil milhões de vezes mais do que a mesma massa de ar. A difusão, através de uma camada de material transparente constituído por partículas de 0,5  $\mu\text{m}$  de tamanho terá a capacidade de difundir aproximadamente 99% da luz incidente, ou seja, suficiente para poder obscurecer completamente a visão através de uma nuvem de aerossóis (52).

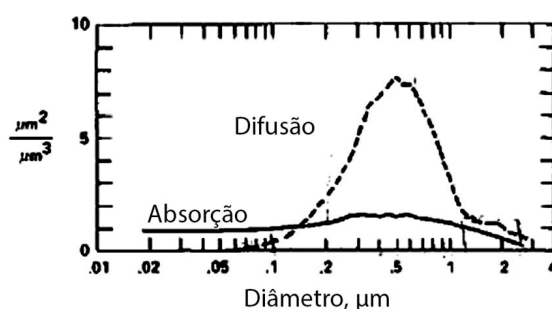


Figura 1.13 Difusão e absorção através de uma partícula única. Para a maioria das partículas a absorção é máxima em diâmetros de partícula de 0,5  $\mu\text{m}$  para c.d.o. de 555 nm.

Por outro lado, a absorção por unidade de volume de aerossol, varia pouco com o tamanho da partícula. Assim, a extinção da luz por partículas com diâmetros inferiores a 0,1  $\mu\text{m}$  é primeiramente devida à absorção (50). O espalhamento por partículas desse tamanho é muito baixo.

A figura 1.14 mostra que para conhecer a difusão de luz devida ao aerossol deve ser tida em conta a sua composição química. Em particular, os compostos que tendem a atrair água na fase de aerossol, tais como sulfatos, podem variar muito na sua eficiência de difusão. Por exemplo, as propriedades óticas de uma dada massa de aerossol recolhida ao longo da parte ocidental árida dos EUA podem ser substancialmente diferentes das propriedades óticas da mesma massa de aerossol recolhida numa massa de ar húmido na parte oriental do país (52).

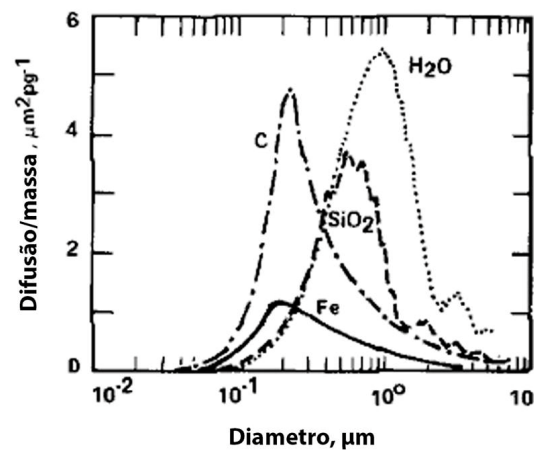


Figura 1.14 Difusão de luz por várias partículas isoladas de substâncias diferentes. Por unidade de massa, a água difunde mais luz que o dióxido de enxofre ou o ferro. Além disso, o pico de eficiência de difusão de água encontra-se por volta de 1 μm, enquanto as esferas de carbono puro ou ferro são os difusores mais eficientes em 0,2 μm. O carbono é a substância que absorve a luz mais eficientemente pois são os mais eficientes para a extinção total da luz (absorção + difusão) (48).

A maior parte do volume e massa do aerossol é distribuída em dois modos: um modo fino e um modo grosso. Os dois modos não se costumam relacionar, geralmente por terem composições, fontes, tempos de vida e mecanismos de remoção diferentes (53, 54).

A fonte de grande parte de partículas finas é a transformação de gases reativos da atmosfera (por exemplo, dióxido de enxofre, compostos orgânicos voláteis e amoníaco) em aerossóis, tais como sulfatos, produtos orgânicos em partículas e compostos de amónia. Tais substâncias transformadas são denominadas por partículas secundárias. Outras fontes importantes do modo fino incluem emissões diretas de partículas ou emissões primárias provenientes da combustão (fogos, automóveis entre outros) e processos industriais. As partículas grossas são geralmente derivadas a partir de processos mecânicos, tais como operações de moagem ou de aragem. Os ventos fortes podem suspender grandes quantidades destas partículas (48).

Tendo em conta a ótica dos aerossóis, uma questão-chave é saber se uma partícula de aerossol é esférica. Para tais partículas, a teoria de Mie é aplicável, sendo que se pode calcular as propriedades óticas a partir do seu tamanho e do índice de refração. Perante a forma fina de partículas suspensas,

foi encontrado um valor inferior a 5% de aerossóis que apresentam forma não esféricas. Enquanto, as partículas grandes são quase exclusivamente não esféricas e, portanto, a aplicação da teoria de Mie para calcular as respectivas propriedades óticas é apenas uma aproximação (48).

Na figura 1.15 o pico de difusão de partículas coincide com o pico do volume de aerossol observado (em massa), de modo que as partículas finas dominam a extinção na maioria dos casos.

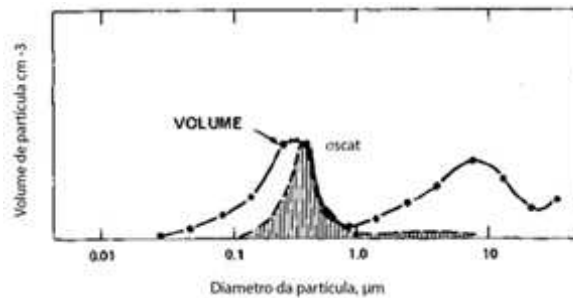


Figura 1.15 Difusão de luz para uma distribuição típica de aerossol. Os coeficientes de difusão da luz são quase inteiramente devidos à gama de tamanhos de 0,1-1,0  $\mu\text{m}$ . O  $\sigma_s$  total e o volume total de aerossol são proporcionais à área por baixo das curvas respectivas (51).

Como o pico e a forma da curva de distribuição bimodal de partículas podem variar, as características de difusão da luz de uma dada massa de partículas também pode variar. No entanto, para o intervalo de distribuição de partículas atmosféricas tipicamente observadas, o coeficiente de difusão calculado por unidade de massa é relativamente uniforme (50).

A dependência do comprimento de onda na difusão de Rayleigh abrange desde a difusão elevada da luz azul em partículas pequenas ( $<0,05 \mu\text{m}$ ) até à difusão da luz branca em partículas maiores ( $>0,05 \mu\text{m}$ ). Assim sendo, as partículas menores que  $0,05 \mu\text{m}$ , presentes nos gases libertados pelos tubos de escape de alguns automóveis apresentam-se em azul sobre um fundo escuro, enquanto uma névoa de gotas grossas de água aparecem em branco. Uma distribuição de tamanho típica de aerossóis em concentrações moderadas tende a difundir mais a luz azul do que a vermelha, mas a dependência do comprimento de onda não é tão forte como para as partículas de abaixo de  $0,05 \mu\text{m}$ . Em geral, tem-se observado que a dependência do comprimento de onda na difusão de luz, diminui à medida que a difusão total e a humidade aumentam (51).

Tendo em conta uma área limpa, em dias que a difusão de Raileigh domina ( $\sigma_{Rg} = 0,012 \text{ km}^{-1}$ ), uma adição de cerca de  $4 \mu\text{g m}^{-3}$  de partículas finas ( $\sigma_s = 0,013 \text{ km}^{-1}$ ) poderia causar um branqueamento substancial do azul natural do céu no horizonte (50). Em contrapartida, com um nível de partículas de  $30 \mu\text{g m}^{-3}$ , a cor do céu seria controlada pelo tipo de aerossol existente.

Comparando a quantidade de luz absorvida com a quantidade de luz difundida por uma distribuição típica de partículas, pode-se verificar que é absorvida menos luz do que difundida. Apenas

10% da quantidade total da luz difundida é absorvida em zonas muito limpas, no entanto, as partículas absorventes podem constituir até 50% da massa de aerossóis (55). A contribuição mais importante para esta absorção (em cidades) parece ser proveniente do carbono grafítico na forma de fuligem (56). A fuligem, altamente absorvente, provém da combustão de combustíveis líquidos, em particular nos motores a gasóleo (50).

As partículas grandes são uma causa pouco relevante na diminuição da visibilidade. As exceções notáveis incluem poeira soprada pelo vento, nevoeiro, cinzas e algumas plumas.

# Capítulo 2

## Visão através da atmosfera

### 1. Sensibilidade espectral do olho humano

A luz visível propaga-se até chegar ao olho. Quando chega ao olho, a luz penetra a córnea sofrendo alterações de direção da sua trajetória e passa através do humor aquoso até atingir a entrada da pupila, limitada pela íris. A quantidade de luz que entra para o segmento posterior do olho ainda sofre desvios, devido ao poder refrativo do cristalino. Após este desvio a luz propaga-se no humor vítreo até atingir a retina onde se encontram os fotorreceptores (57).

O olho humano é um órgão que reage à luz para uma posterior organização e interpretação da imagem, tipicamente irá responder a comprimentos de onda de cerca de 390 a 750 nm (58). Os fotorreceptores, designados por bastonetes e cones, encontram-se localizados na retina. Os bastonetes contêm os fotopigmentos que realizam a captação de estímulos luminosos em condições escotópicas (noturnas) enquanto os cones a realizam em condições fotópicas (diurnas). Estes permitem a diferenciação de cores (59).

Pode-se observar a distribuição dos fotorreceptores na figura 2.1. Os cones encontram-se maioritariamente distribuídos na zona central da retina, enquanto os bastonetes se localizam principalmente na zona periférica (60).

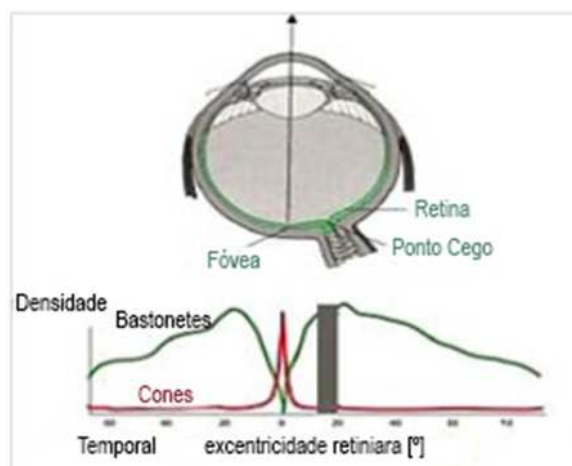


Figura 2.1 Distribuição dos fotorreceptores fotópicos e escotópicos consoante o ângulo em relação à Fóvea.

Nos seres humanos, existem três tipos de fotopigmentos sensíveis à luz em condições fotópicas. Estes têm três picos de sensibilidade com espectros diferentes, o que resulta na visão de cores tricromática (figura 2.2). Os cones são convencionalmente marcados de acordo com a ordem dos picos

das respectivas sensibilidades espectrais de comprimentos de onda: curto (S), médio (M) e longo (L), pois cada um destes tem a uma sensibilidade específica à luz visível (61).



Figura 2.2 Representação gráfica dos três picos de sensibilidade da visão fotópica.

A figura 2.3 representa a sensibilidade em intervalos de cores. Obviamente que isto não é visto desta forma pelo ser humano, cada c.d.o. terá a sua cor específica, mas cada intervalo terá o seu conjunto de cores específicas que têm nomenclatura comum, como o verde.

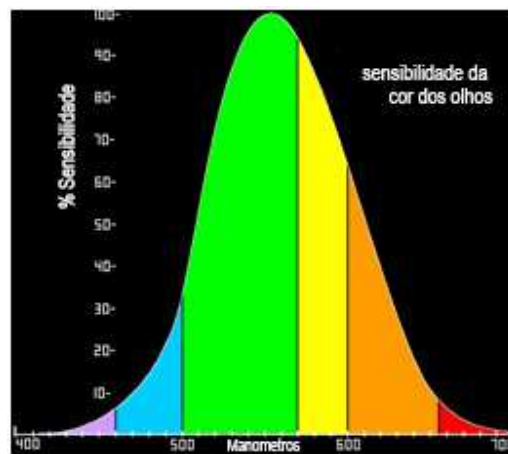


Figura 2.3 Sensibilidade espectral fotópica.

A luz captada chega à retina, principalmente à fóvea, onde se encontra a maior concentração de cones na retina humana (62). Posteriormente, esta informação segue o percurso do nervo ótico até ao cérebro, onde ocorre a interpretação das imagens dentro do campo de visão. O processo de transformação de informação chama-se fototransdução, e corresponde ao fenómeno de transformação de estímulos luminosos, captados pelo olho do exterior, em estímulos elétricos (63).

A resposta do olho e do cérebro à intensidade da luz, ignora a influência da distribuição espectral (c.d.o.). O efeito da cor do fundo, na cor percebida é designado por adaptação cromática. Isto é os processos em que o sistema visual adapta a sua sensibilidade em consequência da intensidade das luzes que observa. Esta mudança de sensibilidade também pode ser consequência da composição espectral da luz e não da sua intensidade ou seja, a capacidade do sistema visual humano de fazer uma adaptação à cor de uma fonte de luz e preservar aproximadamente a aparência de um objeto nas condições desse mesmo fundo. Veja-se o exemplo do céu azul, em que uma área próxima branca poderá assumir a cor complementar do fundo, o amarelo-castanho. Tal acontece porque a cor não está descrita apenas por um sistema de três fotorreceptores, mas por dois sistemas: o modelo tricromático e a teoria dos canais de cores oponentes. Este efeito pode ser muito importante para explicar algumas das cores acastanhadas de nevoeiro atmosférico (64).

À medida que o olho humano se adapta à escuridão, passa a falar-se em condições escotópicas. Nestas condições as células fotorreceptoras dominantes são os bastonetes. Estas células são muito mais sensíveis à luz do que os cones, o que permite uma melhor captação de estímulos luminosos de baixas intensidades. A sensibilidade dos bastonetes é diferente da dos cones, uma vez que o seu fotopigmento tem pico de sensibilidade nos 507 nm, enquanto o conjunto dos três fotopigmentos dos cones tem pico de sensibilidade no c.d.o. de 555 nm (figura 2.4) (65).

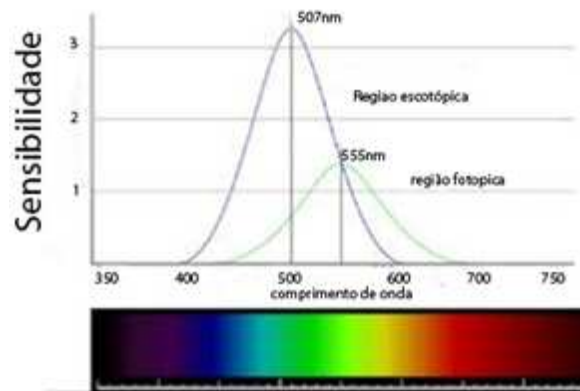


Figura 2.4 Sensibilidade dos fotorreceptores retinianos: cones e bastonetes.

Para além desta caracterização objetiva da cor, existe também uma caracterização subjetiva muito diversificada. Na verdade, a percepção de cor pelo ser humano é um processo subjetivo pelo qual o cérebro responde a estímulos que são produzidos quando a luz atinge a retina.

O olho humano não faz a distinção apenas entre as cores e as intensidades de luz existentes, pois para além do exposto anteriormente, o olho tem a condicionante de não conseguir ver as cores de uma forma absoluta, ou seja, cada c.d.o. pode ser visto e interpretado de várias formas, pois a mesma cor com contraste diferente é percebida de forma diferente (66).

## 2. Acuidade visual e contraste

Existem dois fatores principais que limitam a visibilidade ou o alcance da visão, a acuidade visual e o contraste. A percepção de brilho dos objetos não depende da intensidade de luz absoluta, mas sim da intensidade relativa dos objetos circundantes. Durante o dia, a luz dos faróis de um carro é quase imperceptível, mas quando observados durante a noite a sua luz parecerá mais brilhante, da mesma forma, que numa noite de céu limpo é fácil distinguir uma estrela. Este facto deve-se ao grande contraste entre o brilho da estrela e a escuridão do espaço (67). Normalmente o sistema visual realiza uma interpretação do nível de brilho das áreas circundantes, ou seja, deteta o contraste entre o estímulo e o seu fundo.

Todos os indivíduos deveriam ter um ótimo alcance visual, contudo este facto não se verifica. Por vezes, a percepção é alterada sem o conhecimento consciente do indivíduo, pois o cérebro é portador de uma capacidade de adaptação muito precisa, não sendo possível detetar a debilidade da visão na presença de poeiras leves, de nevoeiro matinal ou mesmo em dias de sol intenso (68).

Em condições de nevoeiro, o contraste entre o objeto e o seu fundo diminui, sendo que quanto mais nevoeiro se encontra presente no ambiente, menor será o contraste. Tendo em conta a função da sensibilidade ao contraste do olho humano, esta tarefa de observação dos objetos em condições de nevoeiro pode ser ainda mais dificultada à medida que diminuimos o tamanho do objeto. O limiar de contraste é particularmente importante para a visibilidade atmosférica, pois é este o fator que influencia a distância máxima de resolução de um objeto (69).

A nível fisiológico, a figura 2.5 mostra o limiar de deteção do contraste de um horizonte brilhante ( $I + \Delta I$ ), contra o qual está a ser detetada uma montanha turva ( $I$ ). As experiências de laboratório indicam que, para a maioria das intensidades de visão fotópica, o contraste ( $\Delta I / I + \Delta I$ ) atinge níveis muito baixos, sendo perceptíveis estímulos até 1,8 a 3% de contraste (69).

No exemplo apresentado na figura 2.5, o limiar de contraste foi analisado apenas considerando o caso de objetos grandes inseridos num fundo uniforme. No entanto, com objetos menores, o tamanho da imagem na retina também limita a percepção de contraste do olho, tendo em conta que um objeto quando se afasta do observador forma uma imagem retiniana mais pequena. E, por sua vez, os detalhes de baixo contraste tornam-se mais difíceis de perceber (figura 2.9). A razão da perda de percepção de contraste não se justifica apenas pelas modificações de intensidade relativa às áreas adjacentes, mas também devido ao facto de o sistema visual ser menos sensível ao contraste, quando o espaçamento das áreas adjacentes diminui. Se o espaçamento é regular, o contraste de uma frequência espacial pode ser facilmente determinado (70).

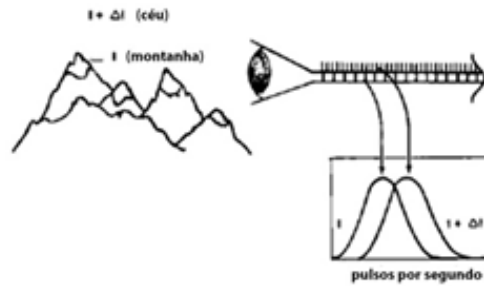


Figura 2.5 O limiar de detecção de contraste envolve a discriminação do campo de sinal ( $I$ ) a partir do seu fundo brilhante ( $I + \Delta I$ ) (69).

A relação entre o limiar de contraste percebido e as características do alvo (tamanho e padrão) é importante para a visibilidade, porque os cenários visuais geralmente contém uma variedade de alvos de diversos tamanhos e formas. Para que se possa calcular a percepção humana de todos os tipos de alvo seria necessária a especificação da distribuição dos tamanhos angulares de cada um. A percepção da textura, que consiste em contornos de pequeno tamanho angular e alta frequência espacial, é particularmente afetada por esta perda do limite da sensibilidade ao contraste, como pode ser observado na figura 2.6 (71).

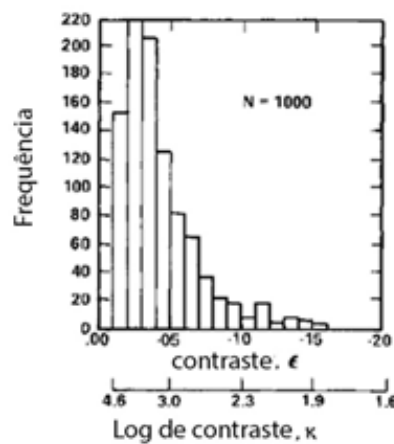


Figura 2.6 Frequência de detecção de um teste padrão com frequência espacial variável (48).

Apesar dos vários fatores que afetam a forma da curva, a sensibilidade ao contraste é geralmente mais alta para os padrões visuais periódicos (figura 2.7) se os espaçamentos apresentam cerca de  $0,33^\circ$  ( $20'$ ) de intervalo. Isto corresponde a pedaços de vegetação vistos a uma distância de 10 km. A figura 2.6 indica que, como os alvos visuais se tornam menores e o seu espaçamento aumenta, o limiar de contraste aumenta progressivamente. O limiar de contraste aumenta para alvos individuais que ocupam menos de  $0,5^\circ$  ( $30'$ ) mas mantém-se constante (cerca de 0,3%) para alvos maiores. A nível de comparação, a Lua e o Sol ocupam cerca de  $30'$  (48).

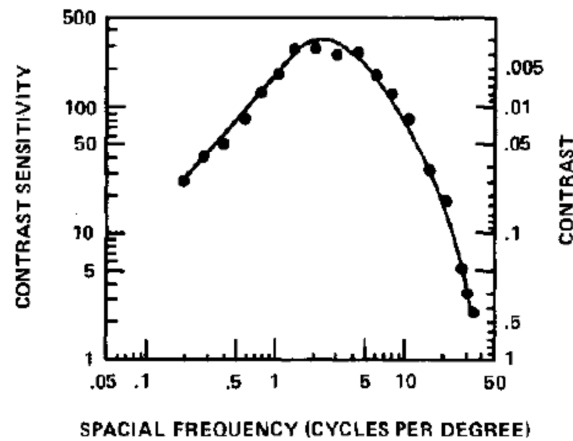


Figura 2.7 Sensibilidade ao contraste obtida para redes sinusoidais de três ciclos por grau correspondente a um limiar de contraste de 0,003 ou 0,3% (72).

Tal limitação, muitas vezes imperceptível, acaba por ter influência em algumas tarefas humanas, tais como, a condução, a rentabilidade de produção ou a capacidade de reação em situações em que seja necessária uma boa visibilidade. Portanto, a visibilidade é fulcral na concretização das atividades do dia a dia, caso não existisse, o ser humano teria que recorrer aos restantes sentidos, levando-o a consequências incalculáveis para o modo de vida conhecido.

A figura 2.7 apresenta uma escala de cinzentos onde é perceptível que o contraste seja uma característica muito importante na interpretação de uma imagem.



Figura 2.8 Escala de cinzentos.

O olho humano tem a capacidade de distinguir diferentes contrastes. O contraste é a relação entre as luminâncias do estímulo e do seu fundo, o que faz com que uma imagem seja distinguível. Na percepção visual do mundo real, o contraste é determinado pela diferença no brilho de um objeto em relação aos outros objetos, dentro do mesmo campo de visão (45).

Uma das definições mais utilizadas de contraste é o contraste de Weber, equação (3), utilizado para um tipo de padrão como pequenos objetos com arestas bem definidas, gráficos como símbolos e caracteres de texto sobre fundos maiores e uniformes:

$$C_w = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{min}} , \quad (3)$$

onde  $L_{max}$  se refere à região mais clara e  $L_{min}$  se refere à região mais escura (73).

O contraste de Michelson, equação (4), é definido como a diferença entre a luminância máxima e mínima sobre a soma da luminância máxima e mínima:

$$C_M = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} . \quad (4)$$

Esta definição é usada tipicamente na teoria do processamento de sinal, no contexto da visão. A diferença na luminância do fundo comparativamente com o estímulo pode ser alterada pela introdução da luz difusa, na trajetória da visão, por um elemento translúcido que obscurece o fundo parcialmente, como poderia ser simplesmente a capacidade de reflexão inferior do material que constitui o fundo (74).

Esta capacidade de comparação da luminância de um objeto com a luminância do fundo adjacente, em vez de detetar luminâncias absolutas, denomina-se constância do contraste simultâneo. Este fenómeno pode ocorrer para a luminância (constância do contraste da luminância), para a cor (constância de cor), para a saturação (contraste simultâneo de saturação) ou ainda para uma combinação de todos os referidos (75).

A habilidade do ser humano em perceber uma imagem (principalmente a distâncias grandes) deve-se em grande parte ao contraste presente nos detalhes, como se pode verificar através da figura 2.8 (76).



Figura 2.9 Comparação relativa de um objeto da mesma cor com fundos diferentes (45).

Quanto maior for o contraste entre um objeto e o seu fundo, mais facilmente percebemos o objeto em causa, sendo a capacidade visual que o indivíduo possui para a sensibilidade ao contraste ( $SC$ ) avaliada através desta proporcionalidade (76).

Quando em presença de um estímulo de baixo limiar de contraste que seja detetável por um indivíduo, pode-se afirmar que o indivíduo tem uma boa sensibilidade ao contraste, figura 2.9, ou seja, a sensibilidade ao contraste, equação (5), varia na proporção inversa do contraste (77):

$$SC = \frac{1}{c} , \quad (5)$$

A sensibilidade ao contraste mede para cada frequência espacial, o limiar de contraste a partir do qual é possível detetar detalhes (78). Para determinar a sensibilidade que um indivíduo tem ao contraste, são realizados testes que apresentam uma determinada frequência espacial expressa em ciclos por grau e com vários contrastes para cada uma dessas frequências. A função de sensibilidade ao contraste (FSC) apresentada na figura 2.9 representa os pontos da FSC. Estes são obtidos quando o observador acertar 50% das apresentações de alvos que lhe são feitas (79). O pico desta função (figura 2.9c) encontra-se na zona do gráfico que representa as frequências espaciais médias, enquanto a resolução no seu nível máximo se apresenta apenas sob condições de alto contraste. Clinicamente, utilizam-se as cartas de Pelli-Robson, e de baixo contraste (figura 2.9b), para obter vários pontos da FSC (79).

O ponto de corte, na figura 2.9c, com o eixo das abcissas, representa o ponto de máxima resolução, ou seja, é a melhor acuidade visual que o indivíduo pode obter, tendo em conta que se encontra com o contraste máximo e frequência espacial máxima (80).

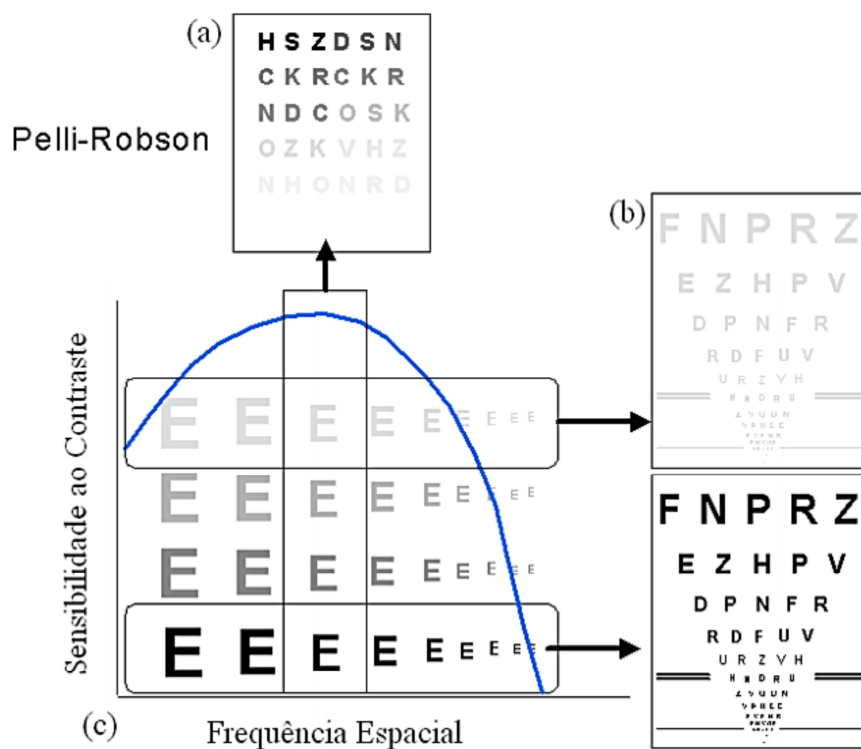


Figura 2.10 (a) Carta de Pelli-Robson para medição da SC; (b) Cartas de baixo e alto contraste; (c) Curva de SC para um observador normal (45).

Estas condições acabam por limitar a visão humana dentro do contexto da influência da atmosfera, porquanto o brilho e o contraste das cores se altera em dias de maior iluminação, logo esta alteração terá influência na visibilidade, consoante as condições atmosféricas.

### 3. Fatores limitantes

O mundo é visto devido à reflexão da luz pelos objetos, sendo esta desviada na direção dos olhos. Como referido anteriormente, o olho humano é o órgão que permite a visão, fazendo a captação e transformação da luz visível em informação para o cérebro. A imagem projetada na retina é formada pelo globo ocular e pelos seus componentes (e posteriormente transmitida ao cérebro). Os raios de luz paralelos, vindos do exterior, entram no olho através da pupila e convergem para a retina (mais concretamente na fóvea) proporcionando uma visão clara, em olhos sem erros refrativos.

Para os estímulos de menores dimensões, é necessário um campo de visão sem perturbações, estímulos de frequências espaciais de tamanho adequado e uma quantidade de contraste suficiente, para além de um bom sistema ótico e detetores na retina adequadamente espaçados. Todos estes fatores têm influência na acuidade visual (79).

Na pratica, a imagem de um objeto pontual não é um ponto. A luz ao propagar-se pela atmosfera, entra no olho e é projetada na retina distribuindo-se por uma pequena area, devido às distorções criadas pela ótica normal do olho (figura 2.10) (80).

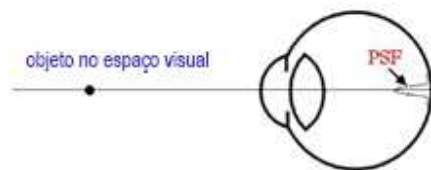


Figura 2.11 Efeito de distorção dos raios luminosos no olho humano.

Esta distorção da imagem projetada na retina é apenas um dos fatores que limita o sistema interno para uma boa visibilidade. A acuidade visual depende de uma série de fatores internos, tais como, o erro de refração e a abertura pupilar. Os erros de refração afetam a acuidade visual, provocando desfocagem na retina e pupilas grandes permitem a entrada de maior quantidade de luz para estimular a retina, que por sua vez reduz a difração<sup>8</sup>, mas em contrapartida a resolução será afetada pelas aberrações periféricas do olho. Por outro lado, pupilas pequenas irão reduzir as aberrações óticas, enquanto a resolução é limitada pela difração.

Na distribuição de cones e bastonetes existem sensibilidades diferentes. Portanto com uma luminância elevada, todas as células estão ativas para um elevado nível de acuidade visual (cones).

---

<sup>8</sup> A difração é um fenómeno que ocorre com a incidência dos raios de luz num orifício aproximadamente da mesma ordem de grandeza que o seu c.d.o.. Ao incidir neste orifício ocorre um desvio na trajetória do raio, onde o raio de luz é dividido, nos seu vários componentes constituintes (c.d.o.). O fenómeno de difracção é mais saliente quanto mais aproxima o tamanho do orifício ao tamanho do c.d.o. (81).

Enquanto em condições de luminâncias baixas, apenas as células sensíveis a esse nível de luminâncias (bastonetes) estão ativas. A medida que a imagem é formada mais longe da fóvea o mosaico da retina torna-se mais grosseiro, alcançando assim, um menor grau de acuidade visual.

A área da retina estimulada também influencia a AV devido à maior concentração de cones na fóvea, a acuidade visual é maior no centro de fixação. O estado de adaptação do sistema visual permite um ajuste ao meio externo, que se define pela quantidade de luz existente. Para além desta adaptação, os olhos movimentam-se constantemente com o objetivo de manter a sua fixação na área correta da retina (82).

O tempo de exposição ao estímulo constitui outro fator limitante da AV. A deteção de um pequeno ponto luminoso depende mais da quantidade de luz do que o tempo de exposição. Contudo, para detetar uma linha, a acuidade visual (largura recíproca da linha) é proporcional ao tempo de exposição.

Para além das limitações internas do olho, existem muitas limitações provenientes do ambiente externo. Como já foi referido, o processo de propagação inicia-se no Sol. A partir do momento em que a luz é libertada ela começa a propagar-se no espaço vazio até chegar as várias camadas da atmosfera terrestre. O efeito da atmosfera que intervém nas propriedades visuais de objetos distantes (por exemplo, o horizonte ou uma montanha), teoricamente, pode ser determinado através da concentração e das características de algumas moléculas presentes no ar, tais como aerossóis e dióxido de azoto entre outros, na linha da visão.

# Capítulo 3

## A visibilidade

A visibilidade pode ser definida como uma condição que permite perceber tudo aquilo que é visível ou que está ao alcance da visão (83). Esta pode ser afetada pelo estado da luminosidade da atmosfera, da reflexão, da absorção e do espalhamento da luz através dos seus próprios obstáculos. A visibilidade para além dos seus limitantes externos também depende da resposta psicofísica e interpretação da luz que chega ao olho humano (84).

A radiação recebida pelo olho provém das imagens do meio ambiente, que é posteriormente convertida em impulsos elétricos, os quais são interpretados e percebidos pelo cérebro. A percepção de contraste e cor não é determinada apenas pelo padrão e intensidade da radiação que entra no olho, mas também pela mistura dinâmica desses, para a melhor interpretação dos dados do campo visual.

A figura 3.1a mostra o caso de um feixe de luz, proveniente do Sol, transmitido horizontalmente através da atmosfera. A intensidade do feixe, na direção do observador, diminui à medida que aumenta a distância da fonte de luz. Esta pode ser absorvida ou difundida para fora do seu percurso, equação (6). Durante um curto intervalo de tempo, esta diminuição é proporcional ao espaço percorrido,  $x$ , e à intensidade do feixe incidente (85).

$$-dI = \sigma_{ext} I dx \quad , \quad (6)$$

onde  $-dI$  é a variação da intensidade,  $\sigma_{ext}$  representa o coeficiente de extinção,  $I$  é a intensidade inicial do feixe e a  $dx$  representa o espaço percorrido num intervalo de tempo muito curto.

Como já foi dito no Capítulo 1, Secção 4, o coeficiente de extinção é determinado pela difusão e absorção das partículas e gases e varia com a concentração de poluentes e com o c.d.o. da luz (85).

Assim como um feixe é atenuado pela atmosfera (figura 3.1a), a luz que atinge o alvo do observador, também é diminuída por difusão e absorção. A redução de brilho, no entanto, não é geralmente o principal fator limitante da visibilidade. Se fosse, dado que a luz percorre a mesma trajetória, as estrelas seriam visíveis de dia e de noite. Para além da luz incidente diretamente no alvo, o observador recebe luz adicional da atmosfera interveniente, pois é difundida para dentro da linha de visão (figura 3.1b).

A intensidade da luz difundida para dentro da linha da visão do observador (figura 3.1), depende da intensidade de luz proveniente de todas as direções, incluindo a luz solar direta, a luz difusa do céu e a reflexão das superfícies, interferindo também a difusão da luz nas moléculas do ar e

os aerossóis suspensos. A extinção da luz transmitida atenua o sinal do alvo, ao mesmo tempo que a difusão da luz aumenta ruído do fundo. Ao longo de um curto intervalo de tempo, a contribuição da luz proveniente do ar é dada pela equação (7):

$$dI = \sigma_{ext}[W \int Q_V(\theta_V) I_V d\Omega] dx \quad , \quad (7)$$

onde  $dI$  é o aumento de intensidade por adição da luz ambiente e os parâmetros entre parênteses retos representam a soma de todas as intensidades de luz provenientes de todas as direções difundidas para dentro da linha de visão. Esta soma depende dos aerossóis e dos parâmetros de difusão do ambiente ( $W \int Q_V$ ) da intensidade da iluminação e ângulo de incidência da luz ( $I_V, \theta_V$ ), integrado em todas as direções ( $\Omega$ ). O  $dx$  representa o espaço percorrido num curto intervalo de tempo (48).

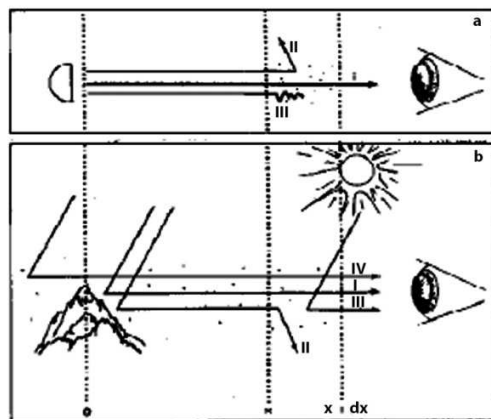


Figura 3.1 (a) Representação esquemática da extinção atmosférica, ilustrando os feixes de luz: (i) transmitida, (ii) difundida, e (iii) absorvida. (b) Representação esquemática de visibilidade diurna, ilustrando: (i) a luz residual refletida do objeto que atinge o observador, (ii) a luz refletida pelo alvo para fora da linha de visão do observador, (iii) a luz da atmosfera interveniente, e (iv) a luz do fundo do campo visual (48).

Uma vez que tanto o coeficiente de extinção como os outros parâmetros variam com o comprimento de onda, a luz adicionada, da atmosfera no percurso da luz pode produzir uma alteração da cor. Em geral, a mudança na intensidade da luz de um objeto para um observador é regida pela extinção da luz transmitida e a adição de luz da atmosfera. A alteração total na intensidade num curto intervalo de tempo é descrita pela equação (8), resultante da adição das equações (6) e (7):

$$dI = -dI \text{ (extinção)} + dI \text{ (luz ambiente)} = -\sigma_{ext}[I dx + W \int Q_V(\theta_V) I_V d\Omega dx] \quad , \quad (8)$$

Nesta expressão, a transferência radiativa constitui a base para a determinação dos efeitos da poluição na visibilidade. A solução geral é muito complicada, a maioria dos modelos de visibilidade incorporam uma série de aproximações para simplificar os cálculos e dados requeridos (85).

O efeito combinado da extinção da luz e a adição da luz da atmosfera, reduz o contraste entre um objeto e o seu fundo. Quanto maior a distância entre o observador e o objeto, menor o contraste. O campo visual é atingido quando o contraste é reduzido a um ponto em que o objeto apenas é perceptível (58).

Pela combinação das equações (1) e (3), obtém-se a equação da lei de Koschmieder:

$$C_x = C_0 e^{-\sigma_{ext} x} , \quad (9)$$

onde  $C_x$  é o contraste entre o objeto e o fundo e  $C_0$  é uma constante de calibração que depende da natureza do objeto e do fundo, bem como das condições de iluminação (74).

Na atmosfera, considera-se que um indivíduo deverá conseguir, em condições normais de visão, capacidade de resolução para um contraste de 5%. Pode-se aplicar este valor à equação (9), que seria como ver um objeto negro contra o horizonte, traduzindo-se em:

$$0,05 = e^{-\sigma_{ext} x} . \quad (10)$$

No âmbito da meteorologia utiliza-se 5%, enquanto na aviação utiliza-se um valor mais restrito de 3% (86).

Pode-se então obter a fórmula de Middleton, que permite quantificar a visibilidade,  $\mathcal{V}^v$ :

$$\mathcal{V}^v = \frac{3}{\sigma_{ext}} , \quad (11)$$

O fator 3 na equação 11 corresponde ao limiar de contraste de 5%. Koschmieder apresentou a mesma fórmula, utilizando um contraste mínimo distinguível de 2%, daí a equação 12:

$$\mathcal{V}^v = \frac{3,9}{\sigma_{ext}} , \quad (12)$$

Através das equações (11) e (12) é possível fazer a seguinte observação: quanto maior o coeficiente de extinção menor será a visibilidade. Portanto quanto maior a concentração de moléculas suspensas entre o observador e o objeto observado menor será a visibilidade possível, pois pela remoção da luminância, por parte das moléculas no ar, o contraste diminui e por sua vez a visibilidade também. Na figura 3.2, observam-se diferentes superfícies a diferentes distâncias o que transmite uma visibilidade mais afetada a grandes distâncias.



Figura 3.2 Cidade de Nampula, Moçambique.

Na figura 3.2 é possível observar que à medida que a distância aumenta entre o observador e o objeto (montanhas da direita para a esquerda), menor é o contraste, pois aumenta a quantidade de espaço no meio onde se encontram as moléculas que provocam o efeito de difusão da luz.

## 1. Fontes significativas de limitação da visibilidade

### 1.1 Fontes naturais

A visão num ambiente natural e não poluído é afetada pela difusão de luz do céu (espalhamento de Raileigh), pela curvatura da superfície da Terra, e pela presença de aerossóis naturais líquidos ou sólidos suspensos no ar. Fontes importantes de aerossóis naturais incluem água (nevoeiro, chuva e neve), poeira levantada pelo vento, incêndios florestais, vulcões, água do mar, emissões vegetais e processos de decomposição. Embora essas fontes, habitualmente não sejam controláveis, elas contribuem para a visibilidade em áreas limpas. Como tal, o seu impacto deve ser considerado na avaliação da deterioração antropogénica da visibilidade.

Os objetos escuros, como as montanhas distantes, quando vistos durante o dia através de uma atmosfera sem partículas, aparentam ter um tom azulado pelo facto da luz azul ser difundida preferencialmente, e consequentemente ser dirigida para dentro da linha de visão. Os picos das montanhas cobertas de neve ou nuvens no horizonte podem parecer mais cor-de-rosa-amarelado, porque os constituintes da atmosfera espalham mais a luz azul de alvos mais brilhantes para fora da linha de visão, deixando as cores dos comprimentos de onda maiores (86).

Num ambiente limpo, a visibilidade esperada encontra-se na gama dos 145-225 km (87). Nas zonas livres de partículas o alcance visual real na atmosfera é também limitado pela curvatura da Terra, pois são poucas as áreas limpas que têm vistas com mais de 200 km de visibilidade (88). Assim

sendo, o espalhamento de Rayleigh raramente é o fator limitante para a detecção de objetos mais distantes, ou seja, o alcance visual. A difusão de Rayleigh é, no entanto, importante para a redução da textura visual e na coloração azulada dos alvos visuais escuros a grandes distâncias. Além disso, a difusão do ar é o único responsável pela cor azul do céu fora da linha do horizonte.

## 1.2 H<sub>2</sub>O condensada

O vapor de água atmosférico é transparente para a radiação visível. A transformação de vapor de água em gotas de condensação (produz névoa, nuvens, ou neve) ou a absorção do vapor por partículas em suspensão, podem alterar drasticamente as propriedades óticas das partículas. Cúmulos de nuvens brancas em convecção podem aparecer repentinamente devido a uma mudança de fase de gás transparente para gotas, que provocam difusão da luz. Esta água condensada é representada por nuvens, chuva, granizo, neve e nevoeiro (86).

A humidade relativa é uma medida da quantidade de vapor de água na atmosfera e, como tal, pode-se considerar um índice do potencial de condensação da água, a partir de fontes naturais ou de origem humana, em forma de partículas pequenas. Em humidades relativas acima de 70%, a condensação do vapor de água sobre as partículas higroscópicas (por exemplo, sulfatos) aumenta significativamente a difusão de luz e reduz a visibilidade (86).

O nevoeiro é um fenómeno natural, que pode reduzir o alcance visual até mesmo a zero. É caracterizado por um elevado conteúdo de água no estado líquido, geralmente superior a 1000 µg m<sup>-3</sup>, distribuída em gotículas com um diâmetro médio de alguns micrómetros ou mais. Em nevoeiros naturais todas as cores são difundidas e absorvidas de forma mais ou menos igual, logo a atmosfera parece branca (50).

Os pesquisadores ambientais têm tido um aumento de interesse na neblina uma vez que pode diminuir a visibilidade e ter um efeito adverso sobre a saúde humana. Devido às emissões precursoras de neblina como o SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e TPS (total de partículas em suspensão), a província de Shandong – China foi classificada como a zona com maior quantidade de emissão no continente Asiático (89). Como resultado, a poluição da cidade de Jinan (capital da província de Shandong) aumenta anualmente a quantidade de dias de neblina grave. O sulfato foi o principal contribuinte para o comprometimento da visibilidade (90).

Com exceção das regiões costeiras e montanhosas, o nevoeiro é raro durante os meses de verão. O aparecimento de nevoeiro tende a ser um evento localizado de, no máximo, algumas horas de duração, geralmente durante as primeiras horas da manhã. Numa base horária, os nevoeiros existem menos que 1% do tempo (91). Assim, a contribuição global de nevoeiro para a degradação da qualidade do ar visual é pequena, e insignificante durante o dia.

A neve é outra das principais causas naturais de degradação da qualidade da visibilidade. É um fator importante em regiões nórdicas e em algumas áreas montanhosas, onde a neve suspensa no ar por ação do vento ocorre entre 1 a 12% de todo o inverno. Durante os meses de inverno as tempestades de neve podem ser responsáveis pela maior parte das horas de visibilidade reduzida e, certamente, podem dominar os episódios de visibilidade extremamente baixa nos meses de inverno (91).

A contribuição natural de neblina, tempestades, neve e outras formas de precipitação pode, portanto, causar uma grave degradação da qualidade da visão humana. Esses eventos intensos, mas pouco frequentes não dominam o alcance visual médio, normalmente apenas uma pequena percentagem das horas que envolve tempestades ou nevoeiro intenso é que podem afetar a visão de forma significativa. Tais efeitos estão atualmente fora do controle humano e raramente são vistos como uma degradação da qualidade da atmosfera visual. Também é interessante notar que a remoção de aerossóis artificiais por precipitação muitas vezes leva a uma atmosfera relativamente clara (86).

### 1.3 Poeira em movimento

Em áreas de areia solta a contribuição de poeira soprada pelo vento, para a degradação da qualidade do espaço visual é um problema importante. O prejuízo visual provocado pelas areias arrastadas pelos ventos é parcialmente natural e parcialmente antropogénico, pois as atividades humanas são responsáveis por uma parte significativa das areias soltas que circulam, logo pode-se dizer que as tempestades de areias são apenas parcialmente naturais. A quantificação destes efeitos é importante para programas de proteção de visibilidade (86).

A coesão das partículas, a força do vento de superfície e a topografia da superfície determinam a suspensão de partículas a partir da superfície. A situação ideal para a suspensão do material da superfície é uma superfície seca, em terreno plano, sem vegetação, pois a agitação dessas superfícies por ventos fortes e turbulência pode transformar um ambiente limpo em uma tempestade de poeira com visibilidade muito reduzida (86).

Do material suspenso durante uma tempestade de poeira, a sua grande maioria é constituída por partículas grandes e sólidas com o volume de décimos de diâmetros de micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) ou mais. A figura 3.3 exibe a distribuição de medidas de volume de partículas, numa grande tempestade de poeira, no Texas. A maior parte das partículas têm um diâmetro maior que 2  $\mu\text{m}$ . Como referido anteriormente, a eficiência de difusão de luz por unidade de massa de partículas grandes é muito baixa em relação ao de partículas finas. No entanto, numa tempestade grave de areia, a massa de partículas maiores é da ordem de vários milhares de  $\text{g m}^{-3}$ , de modo que a extinção total da luz passa a ser pronunciada. Verificou-se que as partículas de poeira (oticamente importantes) em movimento incluem partículas até 40  $\mu\text{m}$  de diâmetro (92).

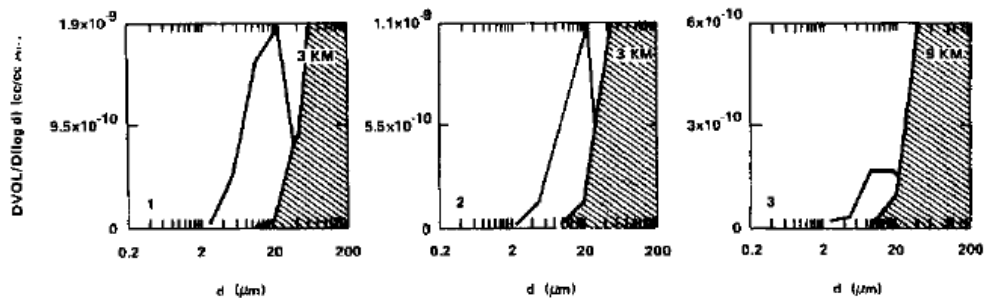


Figura 3.3 Distribuição do volume de aerossóis de poeira recolhida durante uma grande tempestade de poeira em NW Texas em 18 de abril de 1975. As poeiras que são opticamente importantes apresentam picos com cerca de 20  $\mu\text{m}$  de diâmetro (93).

As tempestades de poeira e outros eventos de deposição de poeira, no interior da China fornecem picos de concentração de poeira sazonalmente sobre o nordeste Asiático. A dispersão global de poeira está associada às tempestades de areia do deserto, onde a areia é transportada pelos ventos de oeste com velocidades por volta de cerca de  $20 \text{ m s}^{-1}$ .

Para o controlo contínuo da visibilidade atmosférica na cidade de Gwangju - Coréia, instalou-se um sistema de transmissómetro com o transmissor e o recetor instalados a uma distância de 1,91 km. A média do alcance visual diminuiu de hora em hora de 61,7 para 1,9 km, devido à variação da massa de partículas que variou de 32,9 -  $601,8 \mu\text{g m}^{-3}$  nos períodos em que surgiram as tempestades de areia amarela. A concentração de partículas finas ( $<2.5 \mu\text{m}$ ) foi relativamente inferior à de partículas grossas. O resultado da análise de dados mostrou que as poeiras minerais provenientes do continente foram transportadas simultaneamente com os aerossóis de sulfato antropogénico e os aerossóis marítimos (94).

#### 1.4 Fogos florestais

Uma vez que muitas áreas de atmosferas limpas estão localizadas dentro ou perto das áreas florestais, os incêndios florestais podem ser uma fonte significativa de comprometimento da visibilidade natural. A queima controlada de áreas florestais pela intervenção humana está, cada vez mais, a substituir o processo natural das queimadas descontroladas.

Incêndios florestais prejudicam a visibilidade, produzindo enormes nuvens de fumo visível, causando neblina e visibilidade reduzida sobre grandes regiões dentro do campo de visão. Os estudos sobre o processo de queima e as medições efetuadas nas nuvens dos incêndios florestais indicam que cerca de 80% da massa de partículas de fumo apresenta diâmetro inferior a  $1 \mu\text{m}$  (95, 96). Medições efetuadas em outros incêndios indicam que o alcance visual, em nuvens de fumo, pode ser reduzido até cerca de 1.6 km (97, 98).

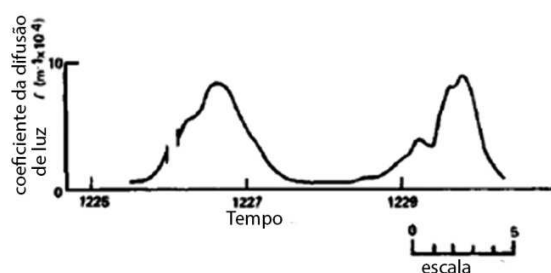


Figura 3.4 (a) Medidas de coeficiente de difusão da luz para uma pluma resultante da queima de floresta. O segmento foi quebrado devido ao ajuste do instrumento ((adaptado de 96).

### 1.5 Fontes naturais de aerossóis secundários

Os aerossóis secundários são formados pela reação atmosférica de emissões de gases que contribuem para o efeito de estufa. Fontes naturais importantes de aerossóis secundários, são as emissões biogénicas de hidrocarbonetos, de várias espécies de enxofre e emissões vulcânicas de dióxido de enxofre. Estas emissões podem, sob várias condições, ser transformadas em partículas finas e prejudicar a visibilidade (87).

As plantas libertam uma série de compostos orgânicos voláteis, principalmente compostos como etileno, isopreno, e uma variedade de terpenos. Apesar de todas estas substâncias serem reativas fotoquimicamente, os terpenos podem ser transformados a partir do estado de vapor, em material particulado. Estudos realizados em camara de fumo demonstraram que os terpenos, provenientes da queima das folhas de pinheiro (acículas), reagem rapidamente com o ozono originando uma névoa azul. A cor azul indica que os terpenos gasosos reagem e formam partículas com diâmetros inferiores a 0,1  $\mu\text{m}$ . As partículas deste tamanho muito fino, vão difundir preferencialmente a luz azul. Nevoas azuis similares têm sido observadas em áreas florestais densas (99, 100).

Deve notar-se que as emissões provenientes de carvalhos são constituídas principalmente de isopreno, que não formam partículas, enquanto as emissões de coníferas são, principalmente, terpenos, os quais formam partículas. Emissões de terpenos tendem a ser maiores em temperaturas mais elevadas, em altitudes mais baixas, e na primavera. Contudo, não existem estudos científicos suficientes das diversas características, como distintas épocas do ano, latitude, temperatura, e condições de sol, logo as estimativas de emissões vegetais devem ser consideradas apenas como aproximações. Os terpenos eventualmente, não podem ser submetidos a uma transformação posterior, que por sua vez cresce até um tamanho que difunde a luz eficientemente (87).

As fontes de enxofre naturais incluem a água do mar, a atividade vulcânica, a deterioração dos tecidos animais e vegetais, algas verdes, atividade microbiológica ao longo de margens de lagos, rios, pântanos e oceanos. No interior as fontes de enxofre são dominadas pelos processos do solo.

As partículas provenientes do vapor da água do mar (das ondas) são geralmente constituídos por partículas de grandes dimensões, mas os seus efeitos de visibilidade estão normalmente limitados às zonas costeiras.

## 2. Alguns efeitos no dia a dia

As investigações sobre a visibilidade no século XX foram feitas de forma sistemática, tendo-se observado uma relação direta entre o baixo contraste e a perda da percepção do movimento dos objetos. Nestas investigações observou-se que existe uma subestimação da velocidade real de alguns objetos bidimensionais com o contraste reduzido. Estes estudos demonstraram que as percepções da velocidade do movimento de alguns objetos bidimensionais são subestimadas quando o contraste visual é reduzido. Enquanto estudos mais recentes, com base em cenários de condução, têm sugerido que a subestimação da velocidade visual em baixo contraste também se aplicam aos movimentos próprios percebidos em ambientes tridimensionais (101, 102, 103).

Foi demonstrado, que a velocidade percebida na condução, não depende do nível global de contraste por si só, mas sim da distribuição espacial de contraste sobre todo o cenário visual. Ao combinar as medições psicofísicas com simulações de condução podemos confirmar que a velocidade é subestimada quando o contraste é reduzido de modo uniforme para todas as distâncias do cenário visual, como por exemplo, quando se tem a o vidro embaciado. No entanto, mostrou-se que, quando a redução de contraste não é uniforme, *p.ex.*, com diferentes contrastes para diferentes distâncias (como é o caso da condução de nevoeiro real), a velocidade visual é sobrestimada, o que por sua vez faz com que os condutores desacelerem os seus veículos (100).

Outro exemplo é a visibilidade de aeronaves. A deteção visual de aeronaves por observadores humanos é um elemento importante para a segurança da aviação. Para avaliar e assegurar a segurança, seria útil ser capaz de prever a visibilidade, de uma aeronave para um observador humano consoante a informação do tamanho, da forma, da distância e da coloração. Os regulamentos de aviação exigem que os pilotos dentro das condições meteorológicas visuais (VMC - *Visual Meteorological Conditions*) sejam capazes de observar e evitar outras aeronaves, a fim de assegurar uma distância mínima segura.

A adoção do TCAS<sup>9</sup> por aeronaves comerciais foi feita de forma generalizada. Este equipamento incorpora um sistema de sinalização que indica a presença de aeronaves nas proximidades e reduziu a dependência da visibilidade. Mas a regra continua a aplicar-se as aeronaves da aviação geral sob as condições de VMC, em que a maioria não tem TCAS. Colisões em pleno ar continuam a ser um problema sério para pequenas aeronaves da aviação geral (104).

Foi observado que o tamanho, ao contrário da forma, produz grandes mudanças na visibilidade. Existe também um efeito de orientação, as três orientações foram: de frente, de lado, e de uma direção oblíqua. Na figura 3.5, (o gráfico da esquerda) note-se que a observação é superior em relação às outras duas.

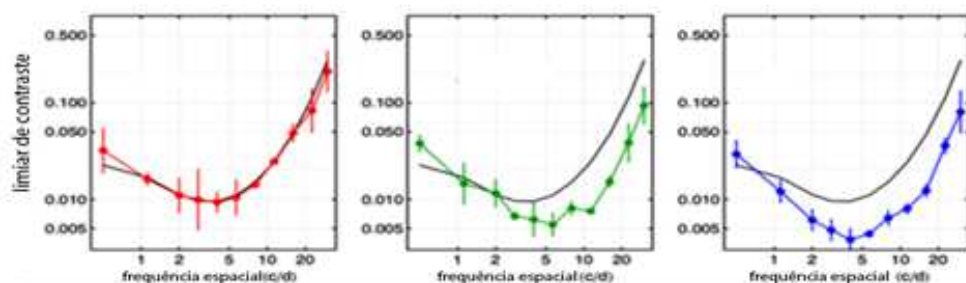


Figura 3.5 Limiar de contraste para alvo de Gabor<sup>10</sup> para três observadores. A curva preta em cada gráfico representa as previsões de um observador padrão. As barras verticais representam um desvio padrão (104).

Foi comprovado que os objetos com contraste positivo em comparação com os objetos com contraste negativo são mais difíceis de ver para um observador padrão (105). No entanto, pouca pesquisa tem sido feita para determinar a viabilidade ou eficácia deste estudo em condições meteorológicas dinâmicas, pois todos os dados obtidos foram obtidos não tendo em conta atenuação da luz em ambientes variados.

A visibilidade é um parâmetro extremamente importante, devido ao fato que a baixa visibilidade pode limitar o movimento de trânsito o que por sua vez terá um impacto nos negócios, na segurança pública e na indústria do turismo (106). A rápida diminuição da visibilidade no subcontinente indiano, mais especificamente em Dehli, onde a visibilidade se reduziu rapidamente ao longo do último período de 30 anos (como mostrado na figura 3.6) (107) tem sido atribuída a um aumento na concentração de aerossóis proveniente do aumento de emissão antropogénica, o que também leva a uma redução da radiação solar que atinge a superfície terrestre (108). O problema é mais crítico durante o inverno, especialmente na zona da Bacia do Indo-Ganges, onde as condições meteorológicas

<sup>9</sup> *Traffic Collision Avoidance System* (TCAS) é um pequeno conjunto de equipamentos eletrónicos de bordo que constitui um sistema de segurança de voo. É incorporado às aeronaves com o objetivo de evitar colisões aéreas com outras aeronaves.

<sup>10</sup> Alvo de *Gabor*: estímulo periódico com frequências e contrastes bem caracterizados

favoráveis auxiliadas por alta concentração de aerossóis (109) levam à formação de nevoeiro frequente, resultando numa visibilidade muito baixa (110).

O Estudo de sensibilidade mostra que a visibilidade não responde fortemente à redução da concentração de massa, ao modo de acumulação insolúvel nem às partículas de poeira do modo grosso. A redução de 10% a 50% da concentração de massa de fuligem e partículas solúveis em água irá levar a um aumento da visibilidade de  $[2,4 \pm 0,1\%; 11,3 \pm 1,6\%]$  e  $[4,9\% \pm 2; 29 \pm 12\%]$ , respetivamente. A redução dos últimos dois componentes antropogénicos são reciprocamente benéficos, pois pode reduzir a formação de nevoeiro e, assim, aumentar ainda mais a visibilidade, juntamente com uma melhor qualidade do ar em termos de saúde associados e efeitos climáticos. (106)

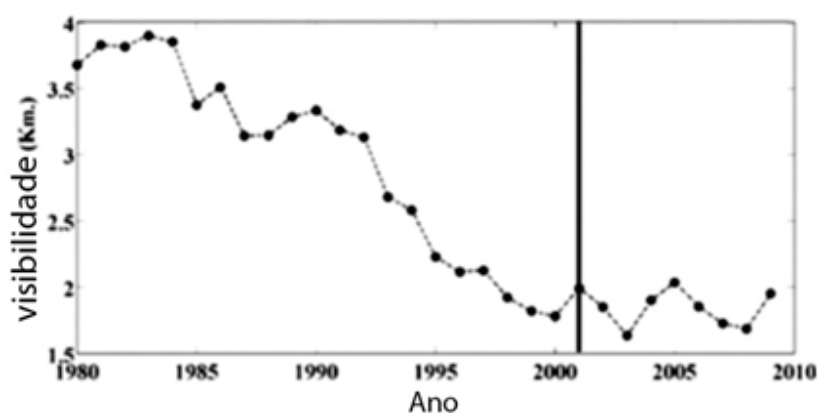


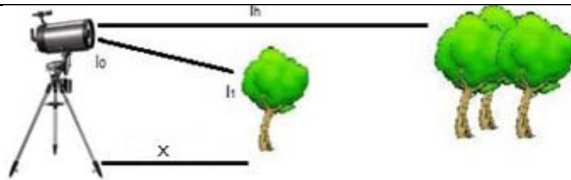
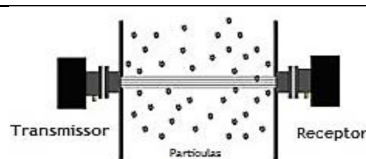
Figura 3.6 Gráfico da variação da visibilidade num intervalo de 30 anos, na cidade de Dehli – Índia (106).

### 3. Quantificação do coeficiente de extinção

Existem diferentes métodos que serviram para uma melhor compreensão dos aspetos mais importantes na avaliação da capacidade visual humana. Entre todas as técnicas disponíveis, podem diferenciar-se as teóricas das que necessitam de uma intervenção prático-experimental. As mais utilizadas foram obviamente as prático-experimentais, pois são estas que permitem colocar em prática a avaliação da capacidade visual.

As técnicas práticas são feitas, por exemplo, através da utilização de um telefotómetro, da análise através da polarização da luz ou da utilização de um transmissómetro. A versão melhorada deste último método foi conseguida através da adaptação das células de extinção/White e de cavidades de ciclos de decaimento. Por fim, a utilização de câmaras de vídeo para posterior comparação das imagens obtidas. Os métodos teóricos consistem no método matemático (através da análise da teoria de Mie) ou na análise de fórmulas químicas de origem empírica. A tabela 3-1 descreve as técnicas, de forma resumida, com uma pequena amostra do seu funcionamento.

Tabela 3-1 Resumo das técnicas utilizadas na quantificação do coeficiente de extinção (adaptado 44).

<b>Métodos experimentais</b>	
Método	Funcionamento
Telefotómetro	 $\sigma_e = \frac{\ln\left[\frac{i_h - i_1}{i_h - i_0}\right]}{x}$ <p>Mede c.d.o. de 550 nm.</p>
Polarização da luz	$C = \frac{I_{particulas} - I_{ar}}{I_{ar}}$ <p> <math>I_{particulas} = I_{\perp partículas} + I_{// partículas}</math>  <math>I_{ar} = I_{\perp ar} + I_{// ar}</math>  <math>I_{\perp x}, I_{// x}</math> componentes polarizadas da luz.                      Mede na zona do visível.                 </p>
Transmissómetro	 <p>Medições predominantes na zona dos 560nm.</p>
Células de extinção ou células de White	Versão melhorada do transmissómetro.
Cavidade de ciclos de decaimento	Versão melhorada do transmissómetro.
Difusão + absorção	$\sigma_s$ e $\sigma_a$ medidos por qualquer método.
<b>Métodos teóricos</b>	
Método matemático	Teoria de Mie.
Fórmula química	$\sigma_e = 3 f(\text{HR})[\text{SO}_4^{2-}] + 3 f(\text{HR})[\text{NO}_2] + 4 [\text{MO}] + 10 [\text{CE}] + [\text{solo}] + 0,6 [\text{PG}]$

Dentre os métodos mais utilizados encontra-se o transmissómetro (figura 3.7), que mede o coeficiente de extinção através da diferença de contraste entre um objeto e o fundo. Consiste na medição com recurso a uma câmara que deteta e avalia a quantidade de energia luminosa que chega depois de propagada num espaço limitado. O transmissómetro é um instrumento para determinação do

alcance visual. Opera através do envio de um feixe estreito colimado de energia, normalmente laser, através do meio de propagação. Um campo estreito de recetor visto a uma distância de medição pré-designada determina a quantidade de energia que chega ao detetor e determina a transmissividade do percurso e o coeficiente de extinção. O c.d.o. mais comum em uso para transmissómetros é de 550 nm, que se localiza no meio do espectro visível permitindo uma boa aproximação do alcance visual (111).

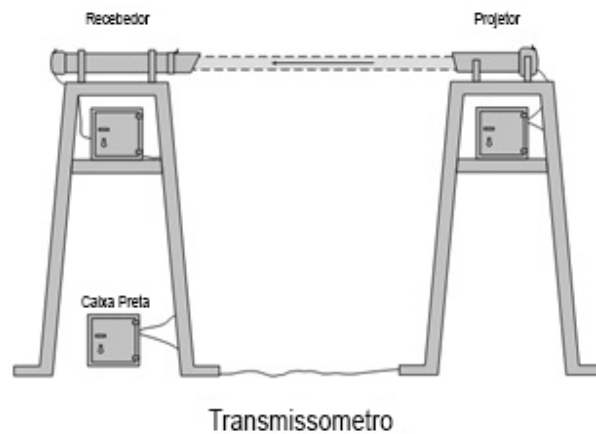


Figura 3.7 Diagrama do equipamento de um transmissómetro (adaptado da 44).

Outra técnica muito utilizada é o telefotómetro (figura 3.8) que foi concebido em 1981 por H. Horvath (112). Esta técnica mede o coeficiente de extinção através da diferença de contraste entre um objeto e o fundo, onde o objeto se encontra colocado a uma distância que permita ser visto com clareza contra o seu fundo. Neste aparelho utiliza-se um telescópio astronómico de tipo refletor que capta a imagem do objeto e do seu fundo. A imagem formada pelo telescópio é focada num fotodetetor e o sinal gerado pelo fotodetetor é proporcional à luminância da imagem. Para obter o coeficiente de extinção, mede-se a luminância do objeto a uma distância tão curta que a atenuação da luz na atmosfera possa ser desprezada, depois repete-se a medição de luminância do objeto a uma distância  $x$  (113, 114, 115).

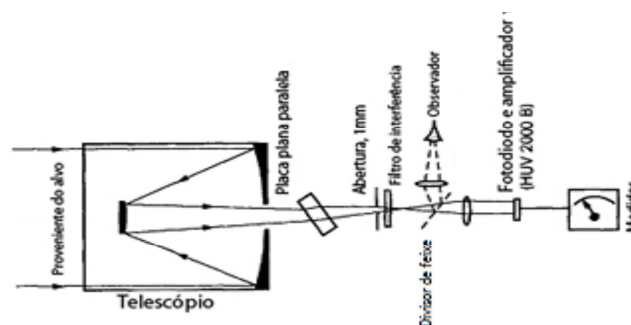


Figura 3.8 Diagrama do equipamento de um telefotómetro (44).

A visibilidade foi medida através da polarização da luz, em 1982 por R. Clark (44). Ele pretendia medir o coeficiente de extinção comparando as propriedades de polarização da luz que sofre difusão devido a partículas suspensas na atmosfera e as propriedades de polarização da luz, que sofre difusão de Rayleigh devido às moléculas do ar. O instrumento proposto por Clark consiste num telefotómetro modificado, ao qual foi adicionado um polarizador linear rotativo e que mede a intensidade de duas componentes da luz polarizadas e perpendiculares entre si, ao longo do espectro visível. O valor de visibilidade é obtido através do contraste entre as intensidades das duas componentes linearmente polarizadas da luz difundida pelo ar (um dia de fundo de céu limpo) e as intensidades das mesmas componentes num dia com partículas em suspensão na atmosfera (115).

Ao longo do tempo as técnicas existentes sofreram melhorias, pois foram feitas medições da visibilidade com versões melhoradas do transmissómetro, uma designada por técnica de células de extinção ou células white (116) e a outra denominada por cavidades de ciclos de decaimento (117).

Para além das técnicas experimentais para a obtenção do coeficiente de extinção visual atmosférico existe o tratamento de dados através dos cálculos teóricos da teoria de Mie e de Rayleigh que ficaram de fora do âmbito deste trabalho.

# Comentários finais e linhas futuras

Neste trabalho fez-se uma pesquisa dos fatores que influenciam o coeficiente de extinção e conseqüentemente também a visibilidade. Procurou-se saber as várias fontes que prejudicam a visão ao absorver, difundir e refletir a radiação eletromagnética.

A atmosfera contém matéria de variadas fontes, constituições, densidades, tamanhos e concentrações, cada um destes fatores com o seu impacto na propagação da luz visível. Já foram feitos múltiplos estudos nesta área, pois a visibilidade é um parâmetro de elevado interesse para a comunidade científica e com efeitos no dia a dia da população em geral.

Existem vários métodos utilizados para medir o coeficiente de extinção, no entanto não existe nenhuma indicação clara de qual o método mais adequado para esta medição. Os métodos recentes são baseados nos métodos usados nas décadas de 60 e 70. Assim sendo, optou-se pela pesquisa de base dos métodos utilizados juntamente com os resultados obtidos nos últimos 15 anos. Foi visto que existe uma degradação gradual do alcance visual principalmente nas cidades industriais, onde se encontra a maior concentração de poluentes no ar, o que faz com que a qualidade da visibilidade esteja a diminuir de forma geral, pois os poluentes dispersam-se à medida que o tempo passa, criando um espaço uniformemente poluído, o que por sua vez aumenta o coeficiente de extinção.

O trabalho foi apenas feito através de uma base de dados teóricos, pois por falta de tempo não foi possível efetuar a vertente prática para quantificar o coeficiente de extinção num ambiente natural. Existe uma base de dados muito grande de investigação a ser construída à volta deste assunto, pois o coeficiente de extinção é usado em varias áreas, por exemplo, meteorologia, estimativas de concentrações de plumas aéreas, entre outros.

Para dar continuidade ao trabalho feito é necessário criar planos de conservação do nosso ambiente, pois é o principal fator que influencia a nossa visão atmosférica e apenas com o controlo de emissões antropogénicas podemos manter a visibilidade que se tem hoje, ou melhora-la quando/onde for caso disso. É também preciso fazer investigação em profissões específicas com diferenças nas necessidades visuais. É importante tentar implementar algumas medidas de precaução em países em desenvolvimento, ou seja, é relevante a divulgação desta informação para melhorar as condições visuais no mundo. Para além dos efeitos positivos na visibilidade, estas medidas também nos ajudarão a manter um ambiente geralmente mais saudável.

Por uma questão de tempo e falta de serviço de internet não foi possível fazer um estudo mais aprofundado. Faltou fazer a comparação de vários estudos paralelos para garantir que os valores

obtidos realmente se devem às condições da atmosfera, nomeadamente por influencia de gases ou partículas aí existentes.

# Bibliografia

1. Ruskin J. Of the Open Sky: Modern Painters I, Part II, Section III. London: Hanson & Co.;1906
2. How Round is the Sun? [Internet] NASA; [2 Out 2008].
  - Disponível em:  
[http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/02oct\\_oblatesun/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/02oct_oblatesun/)
  - Citado 7 de março de 2011.
3. First Ever STEREO Images of the Entire Sun. [Internet]\_NASA; [6 Fev 2011].
  - Disponível em:  
[http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2011/06feb\\_fullsun/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2011/06feb_fullsun/)
  - Citado 7 de março de 2011
4. Woolfson M. The origin and evolution of the solar system. *Astronomy & Geophysics* - 2000, Feb; 41, Issue 1: p.1.12-1.19.
5. Lodders K. Solar System Abundances and Condensation Temperatures of the Elements. *Astrophysical Journal* - 2003, Jul; 591 (2): p.1220-1247.
6. Hansen CJ. *Stellar Interiors: Physical Principles, Structure, and Evolution*. New York [u.a.]: Springer; 2004
7. Ministerio da ciência e tecnologia (1997). *Reações de Fusão* [internet]. São José dos Campos, SP, Brasil. 1997.
  - Disponível em:  
[http://www.plasma.inpe.br/LAP\\_Portal/LAP\\_Sitio/Texto/Reacoes\\_de\\_Fusao.htm](http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Reacoes_de_Fusao.htm)
  - Citado 10 de agosto de 2012
8. Vogt G. *The atmosphere: Planetary Heat Engine*. Illustrated edition. Minneapolis Minnesota: Twenty-First Century Books; 2007.
9. Summers ME, Strobel DF. Icarus, Photochemistry and Vertical Transport in Io's Atmosphere and Ionosphere. *Elsevier Inc* - 1996, Apr; 120 (2): P.290-316.
10. Meteorologia-tripod. As camadas da Atmosfera [Internet] Tripod; [28 Jan 2000]
  - Disponível em  
[www.meteorologia.tripod.com](http://www.meteorologia.tripod.com)
  - citado 28 março 2011
11. Hinds WC. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. 2<sup>nd</sup> edition. Michigan University: Wiley-Interscience; 1999 Jan.
12. Duxbury & Duxbury. *Introduction to the World's Oceans*. 5<sup>th</sup> edition. Dubuque, IA: Wm. C. Brown Publishers; 1997.
13. Exosphere. A Dictionary of Astronomy 1997 [Internet]. *Encyclopedia.com*. 5 Jul. 2012
  - Disponível em:  
<http://www.encyclopedia.com>
  - Citado 08 de junho de 2012
14. About Atmospheric Models at SPDF [Internet]. NASA.
  - Disponível em:

[http://modelweb.gsfc.nasa.gov/spdf\\_models\\_home.html#atmo](http://modelweb.gsfc.nasa.gov/spdf_models_home.html#atmo)

- citado 02 de maio de 2012

15. Axford WI. Discovering the earth's magnetosphere. *Advances in Space Research* - 1982; 2: no.1.
16. Ahrens CD. *Essentials of Meteorology*. 5<sup>th</sup> edition. Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole; 2005.
17. Prölss GW, Bird MK. *Physics of the Earth's Space Environment*. 2004 edition. Heidelberg: Springer Verlag; 2011.
18. Leinert C, Grün E. *Interplanetary Dust. Physics and Chemistry in Space* (R. Schwenn and E. Marsch eds.). Springer-Verlag - 1990; 20: p.207-275.
19. Seinfeld JH, Pandis SN. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 2<sup>nd</sup> edition, New Jersey: Wiley; 2006.
20. US Standard Atmosphere, *Publication NOAA-S/T76-1562*, Washington DC: US Government Printing Office; 1976.
21. Danielson EW, Levin J, Abrams E. *Abrams Meteorology*. 2<sup>nd</sup> Edition. California University: McGraw Hill; 2003
22. Hill M. *Concise Encyclopedia of Science & Technology: Troposphere*. 6<sup>th</sup> Edition. University of Indiana: McGraw-Hill; 2009.
23. Frank PJ, David PW. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 3<sup>rd</sup> Edition. [S.l.]: John Wiley & Sons; 1990.
24. Peixoto JP, Oort AH. *Physics of Climate: Chapter 2: Nature of the Problem*. 3<sup>rd</sup> edition. American Institute of Physics; 1992.
25. Curry JA, Webster PJ. *Thermodynamics of Atmospheres and Oceans*. San Diego: Academic Press, Elsevier; 1999.
26. U.S. Department of commerce: National Oceanic & atmospheric administration. United States of America; 2010 [Internet]  
- Disponível em:  
<http://www.esrl.noaa.gov/>  
- Citado 16 de outubro de 2012
27. Lide DR. *Handbook of Chemistry and Physics: A Ready-reference Book of Chemical and Physical Data*. 89<sup>th</sup> edition. London: CRC Press; 2008.
28. Finlayson-Pitts BJ, Pitts JN, Jr. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere Theory, Experiments, and Applications*. San Diego: Academic Press; 2000.
29. Fowles GR. *Elementary Optical Phenomena and the Nature of Light, Introduction to Modern Optics*. 2<sup>nd</sup> edition. New York: Dover Science; 1989.
30. Fowles GR. *Elementary Optical Phenomena and the Nature of Light: Introduction to Modern Optics*. 2<sup>nd</sup> edition. New York: Dover Publications; 1989.
31. *Asrofísica y Física: Noticias y artículos sobre astronomía, astrofísica, física y ciencia en general* [Internet]  
- Disponível em:  
<http://www.astrofisicayfisica.com>

- Citado 16 de outubro de 2012
32. Simon A. The real science behind the X-files: microbes, meteorites and mutants. Reprinted edition (Jan 1999). University of Maryland: Simon & Schuster; 2001.
  33. Sonke J. The Optics of Life: A Biologist's Guide to Light in Nature. Illustrated edition. Princeton University Press; 2012.
  34. Ferreira M. Ótica e Fotónica. Aveiro: Lidel - Edições Técnicas, Lda; 2003.
  35. Equinoxes, solstices, Perihelion and Aphelion, 2000-2020. [Internet] U.S. Naval Observatory (USNO)
    - Disponível em:
    - <http://www.usno.navy.mil/>
    - Citado 18 de julho de 2012
  36. Meyer-Arendt JR. Introduction to Classical and Modern Optics. 4<sup>th</sup> Edition. Addison-Wesley: Benjamin-Cummings Pub Co; 1994.
  37. Nielsen RS. Real Time Rendering of Atmospheric Scattering Effects for Flight Simulators. Lyngby. Dissertação [mestrado em informática] - Danmarks tekniske universitet; 2003.
  38. Farin G, Hansford D. Gerald. Practical linear algebra: a geometry toolbox. Germany A K Peters/CRC Press; 2004.
  39. Wolf K B. Geometry and dynamics in refracting systems. European Journal of Physics - Jan 1995; 16: No.1.
  40. Born M, Wolf E. Principles of Optics. Cambridge: Cambridge University Press; 1999, Oct.
  41. Bohren CF, Huffman DR. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. 1<sup>st</sup> edition. University of California: John Wiley & Sons; 2007
  42. Irwin J. Full rendering of the earth's atmosphere using a physical model of Rayleigh scattering. In proceeding of the 1996 eurographics UK conference, March 26-28, 1996; Manchester: University of Manchester - 1996; 1: p.103 - 115.
  43. Preetham AJ, Shirley P, Smits B. A practical analytic model for daylight. In proceedings of the 26<sup>th</sup> annual conference on computer graphics and interactive techniques. ACM Press/ Addison-Wesley Publishing Co - 1999; p.91-100
  44. Cesar P. PORTAL DE ESTUDOS EM QUÍMICA - O EFEITO TYNDALL [internet]. Brazil; 2012 ABR 2012 [ Updated 2013 Mai 19].
    - Disponível em:
    - <http://www.profpc.com.br/Solu%C3%A7%C3%B5es.htm>
    - citado 11 de outubro de 2012
  45. Ambrósio PC. Desenvolvimento de um sistema para medição de visibilidade: Medição do coeficiente de extinção de partículas atmosféricas. Covilhã. Dissertação [Mestrado em Optometria] - Universidade da Beira Interior; 2011.
  46. Casperson LW. Light extinction in polydisperse particulate systems. Applied Optics - 1977, Dez, 1; 16 (12): p.3183-3189.
  47. Porch W, Galloway T, Green T, Ellaesser H. Long path optical extinction and meteorology in the San Francisco Bay Area. Atmospheric Environment - 1981; 15: p.2555-2560.

48. United States. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards. PROTECTING VISIBILITY - An EPA Report to Congress, Chapter 2. United States: The Agency; 1979. 244 pages.
49. Holt Rinehart & Winston. Holt Science and Technology: Weather and Climate: Short Course I. United States: Holt Rinehart Winston; 2002.
50. Charlson RJ, Waggoner AP, Thielke JF. Visibility Protection for Class I Areas. The Technical Basis. Report to Council of Environmental Quality. Washington, DC; 1978.
51. Husar R, White WH, Patterson DE, Trijonis J. Visibility Impairment in the Atmosphere, Draft report prepared for U.S. Environmental Protection Agency under Contract Number 68022515, Task Order 28; 1979.
52. Faxvog FR. (1975) Optical Scattering per Unit Mass of Single Particles. *Applied Opt*; 14: p.269-270
53. Faxvog FR, Roessler. (1978) Carbon Aerosol Visibility versus Particle Size Distribution. *Applied Opt*; 17: p.261-262.
54. Whitby KT, Lusar RB, Lui BYH. The Aerosol Size Distribution, *J. Colloid Interface Sci* - 1972; 39: p.177-204.
55. Waggoner AP et al. Optical Absorption by Atmosphere Aerosols. *Applied Optics* - 1973; 12: p.896.
56. Novakov R et al. Report, LBL-6819, Lawrence-Berkeley Laboratory, Berkeley, California; 1977.
57. Kolb H. Simple Anatomy of the Retina. [Internet] 2011 [updated 2011 Oct 8];]. *Webvision*. University of Utah.  
- Disponivel em:  
<http://webvision.med.utah.edu/book/part-i-foundations/simple-anatomy-of-the-retina/>  
- Citado 21 de novembro de 2012
58. Starr C. *Biology: Concepts and Applications*. 7th edition. Belmont, CA: Brooks Cole; 2007.
59. Björn LO. *Photobiology: The Science of Light and Life*. Illustrated edition. Netherlands: Springer; 2002.
60. Oyster CW. *The human eye: structure and function*. The University of Alabama at Birmingham. Sinauer Associates; 1999 Jun.
61. Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, et al. *Neuroscience*. 2<sup>nd</sup> edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates; 2001.
62. Schwartz SH. *Visual Perception: A Clinical Orientation*. 4<sup>th</sup> edition. New York: McGraw Hill Professional; 2009.
63. Judd DB, Günter W. *Color in Business, Science and Industry*. Wiley Series in Pure and Applied Optics. 3<sup>rd</sup> edition. New York: Wiley-Interscience; 1975.
64. Fox DG, Loomis RJ, Green TC. Psychophysics and Visibility Values. In: *Proceedings of the Workshop on Visibility Values*. Fort Collins, Colorado: U .S. Forest Service; 1979.
65. Wade NJ, Swanston MT. *Visual Perception: An Introduction*. 3<sup>rd</sup> edition illustrated. East Sussex:

Psychology Press; 2013.

66. Santana C, Oiwa N, Costa M, Tiedemann K, Silveira L, Ventura D. Espaço das Cores. Espaço de Cores. São Paulo: Psicologia - USP; 2006 Abr; 17(4): p.35-62.
67. Kepler SOF. Astronomia e Astrofísica:O universe como um Todo: Cosmologia. [Internet] 2012 [updated 2013 mar 24;]. Universidade federal do Rio Grande do Sul.  
- Disponível em:  
<http://astro.if.ufrgs.br/>  
- Citado 21 de setembro de 2012
68. Hurley JB. Shedding Light on Adaptation. Journal of General Physiology - 2002 Feb; 119 (2): p.125-128.
69. Gregory RL. Eye and Brain: the Psychology of Seeing. McGraw-Hill Book Co., New York; 1978.
70. Middleton, W. E. K. Vision through the Atmosphere. Toronto - Canada: University Toronto Press; 1952.
71. Henry RC. The Application of the Linear System Theory of Visual Acuity to Visibility Reduction by Aerosols. Atmospheric Environment - 1977; 11: p.697-701.
72. Campbell FW, Maffei L. Contrast and Spatial frequency. Scientific American - 1974, 231: p.106-112.
73. Travnikova NP. Efficiency of Visual Search. Soviet J. Optical Technology. Mashinostroyeniye - 1985; 53: P.4.
74. Michelson AA. Studies in Optics. Reprinted edition. New York: Courier Dover Publications; 1995
73. Brien Holden Vision Institute - Neurofisiologia & percepção visual. Universidade Lúrio; 2012 Mar.
74. Casperson L. Light extinction in polydisperse particulate systems. Applied Optics. 1977 Dez; 16.
75. Janeiro F, Wagner F, Ramos P, Silva A. Atmospheric Visibility Measurements Based on a Low-Cost Digital Camera. In 6th Conference on Telecommunications; 2007; Peniche, Portugal. p.4.
76. McIlwain JT. An Introduction to the Biology of Vision. Cambridge: Cambridge University Press; 1996.
77. Campbell FW, Maffei L. Contrast and spatial frequency. Scientific American - 1974; 231, p.106-114.
78. Mogo S. Sebenta - Fundamentos de Optometria. Universidade da Beira Interior; 2010 Jan.
79. Tortora GJ, Grabowski SR. Corpo humano: fundamentos de anatomia e fisiologia. 6ª edição. Brazil: Artmed; 2008.
80. Dome EF. Estudo Do Olho Humano Aplicado a Optometria. 4ª edição. São Paulo: Editora São Paulo; 2008.
81. Keller JB. Geometrical Theory of Diffraction. Journal of Optometry - 1962; 52: p.116 - 130.
82. Benjamin WJ. Clinical refraction. Philadelphia: WB Saunders company; 1998

83. Bruno MMA. Avaliação educacional de alunos com baixa visão e múltipla deficiência na educação infantil: Uma proposta de adaptação e elaboração de instrumentos. [Tese - Doutorado em Educação]. São Paulo: Faculdade de Filosofia e Ciências, Universidade Estadual Paulista; 2005.
84. Naylor J. Caído del Cielo: guía para observar el firmamento de día y de noche. Akal, S.A.; 2005
85. Latimer DA, Bergstrom RW, Hayes SR, Liu MK, Seinfeld JH, Whitten GZ, Wojcik MA, Hillyer MJ. The Development of Mathematical Models for the Prediction of Anthropogenic Visibility Impairment; EPA-450/3/78-110a; 1978.
86. United States. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards. PROTECTING VISIBILITY - An EPA Report to Congress, Chapter 6. United States: The Agency; 1979. 244.
87. Environmental Protection Agency, 2001. Visibility in Mandatory Federal Class I Areas (1994-1998). Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, NC.
88. Deng JAB, Dua K, Wang KA, Yuan CSC, Zhao JA. Long-term atmospheric visibility trend in Southeast China, 1973-2010. *Atmospheric Environment* - 2012; 59: p.11-21.
89. Zhang Q, Streets D, Carmichael G, He K, Huo H, Kannari A, Klimont Z, Park I, Reddy S, Fu J. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. *Atmospheric Chemistry and Physics* - 2009; volume: 9 (14): p.5131-5153.
90. Cheng SH, Yang LX, Zhou XH, Xue LK, Gao XM, Zhou Y, Wang WX. Size-fractionated water soluble ions, situ pH and water content in aerosol on hazy days and the influences on visibility impairment in Jinan, China. *Atmospheric Environment* - 2011; 45: p.4631-4640
91. Conway HM. Ed. *The Weather Handbook*. London: Conway Publications; 1963.
92. Patterson EM, Gillette DA, Grams GW. The Relation Between Visibility and The Size - Number Distribution of Airborne Soil Particles. *J. Appl. Mgt.* - 1976; 15: p.470-478.
93. Gillette DA, Clayton RN, Mayeda TK, Jackson ML, Sridhar K. Tropospheric Aerosols from Some Major Dust Storms of the Southwestern. U.S. *Journal of Applied Meteorology* - 1978; 17: p.832-845.
94. Kim KW, Kim YJ, Oh SJ. Visibility impairment during Yellow Sand periods in the urban atmosphere of Kwangju, Korea. *Atmospheric Environment* - 2001; 35: p.5157-5167
95. Sandberg DM, Martin D. Particle Sizes in Slash Fire Smoke. U. S. Department of Agriculture, Forest Service-1975; Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station Research Paper PENW-99.
96. Radke LF, Stith JL, Hegg DA, Hobbs PV. Airborne Studies of Particles and Gases from Forest Fires. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* - 1978; 28: p.30-34.
97. Eccleston AJ, King NK, Packham DR. The Scattering Coefficient in Mass Concentration of Smoke from Some Off Strand Forest Fires. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* - 1974; 24(11): p.1047-50.
98. Packham DR, Vines RG. Properties of Bushfire Smoke. The Reduction in Visibility Resulting from Prescribed Fires in Forests. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* -1978; 28 (8): p.790-795.
99. Jeffries HE, White O Jr.  $\alpha$ -Pinene and Ozone: Some Atmospheric and Biospheric Implications. Dept. of Environ. Sci. and Engineering. University of North Carolina, Chapel Hill, N.C.; 1967.

100. Pretto P, Bresciani JP, Rainer G, Bülthoff HH. Foggy perception slows us down, Pretto *et al.* *eLife* - 2012, Oct, 30; 1: e00281.
101. Snowden RJ, Stimpson N, Ruddle RA. Speed perception fogs up as visibility drops. *Nature* - 1998; 392: p.450.
102. Horswill MS, Plooy AM. Reducing contrast makes speeds in a video-based driving simulator harder to discriminate as well as making them appear slower. *Perception* - 2008; 37: p.1269-75.
103. Owens DA, Wood J, Carberry T. 2010. Effects of reduced contrast on the perception and control of speed when driving. *Perception*; 39:1199-215.
104. Watson A, Ramirez CV, Salud E. Predicting Visibility of Aircraft. *PLoS ONE* - 2009; 4(5): p.5594.
105. Howell WD. Determination of daytime conspicuity of transport aircraft. U.S.A.-Indiana polis, Indiana: Civil Aeronautics Administration Technical Development Center; 1957
106. Singh A, Dey S. Influence of aerosol composition on visibility in megacity Delhi. *Atmospheric Environment* - 2012; 62: p.367-373
107. Wang K, Dickinson RE, Liang S. Clear sky visibility has decreased over land globally from 1973 to 2007. *Science* - 2009; 323 (5920): p.1468-1470.
108. Wild M, Gilgen H, Roesch A, Ohmura A, Long CN, Dutton EG, Forganm B, Kallis A, Russak V, Tsvetkov A. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface. *Science* - 2005; 308: p.847-850.
109. Tiwari S, Payra S, Mohan M, Verma S, Bisht DS. Visibility degradation during foggy period due to anthropogenic urban aerosol at Delhi. *Atmospheric Pollution* - 2011 (India); 2: p.116-120.
110. De US, Dandekar MM. Natural disasters in urban areas. *Dec. Geograph* - 2001; 39 (2): p.1-2.
111. Clark R. Method and Apparatus for Measuring Visibility from the Polarization Properties of the Daylight Sky. California patent 4.362, 387; 1980 Ago.
112. Horvath H. The University of Vienna Telephotometer. *Atmospheric Environment* - 1981, Jul, 14; 15(12): p.2537-2546.
113. Horvath H. Spectral extinction coefficients of background aerosols in Europe, North and South America: a comparison. *Atmospheric Environment* - 1991; 25A (3/4): p.725-732.
114. Trier A, Horvath H. Atmospheric Extinction in Santiago, Chile. *Journal Aerosol Science* - 1989; 20: p.1197-1200.
115. Horvath H, Trier A. A study of the aerosol of Santiago, Chile: Light extinction coefficients. *Atmospheric Environmental* - 1993; 27A(3): p.371-384.
116. Virkkula A, Ahlquist N, Covert D, Sheridan P, Arnott W, Ogren J. A three-wavelength optical extinction cell for measuring aerosol light extinction and its application to determining light absorption coefficient. *Aerosol Science and Tehnhology* - 2005; 39: p.52-67.
117. Butler T, Miller J, Ewing A. Cavity ring-down spectroscopy measurements of single aerosol particle extinction. I. The effect of position of a particle within the laser beam on extinction. *The Journal of Chemical Physics*. May 2007; 126, p. 17.