

# CAUSAS DA ILUMINAÇÃO NÃO UNIFORME EM FOTOGRAFIAS AÉREAS COLORIDAS

*Origins of non-uniform lighting in aerial color photographs*

**Daniel Carneiro da Silva<sup>1</sup>**  
**Ana Lucia Bezerra Candeias<sup>2</sup>**

**Universidade Federal de Pernambuco**  
**Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**  
Departamento de Engenharia Cartográfica - CTG  
Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n Cidade Universitária  
50740-530 - Recife-PE  
danielcs@ufpe.br<sup>1</sup>  
analucia@ufpe.br<sup>2</sup>

## RESUMO

A não uniformidade da intensidade de brilho, muito comum nas fotografias aéreas, é fato bem conhecido da fotogrametria e a solução tradicionalmente adotada é o uso de filtros especiais colocados sobre a lente. Atualmente, com o incremento de uso de fotografias coloridas, digitalizadas ou obtidas com câmeras digitais, e de imagens de satélites de alta resolução, o assunto tem sido estudado com o objetivo de desenvolver programas e algoritmos de processamento de imagens, que façam a correção automaticamente e gerem imagens pré-processadas com uniformidade de intensidade e de matizes das cores, para formação de mosaicos. Este trabalho analisa os fatores físicos e as geometrias que criam as diferenças de intensidade e iluminação nas fotografias aéreas, como escurecimento das bordas e áreas brilhantes (*hot spots*) e mostra, com exemplos, que quase sempre são provocadas por efeitos combinados de vinheta, névoa e iluminação solar. Mostra ainda um modelo simplificado que avalia o espalhamento da névoa, e o compara com os efeitos da FDRB-Função de Distribuição da Refletância Bi-direcional. Simulações utilizando o modelo indicam que mesmo quando a névoa é imperceptível ela é suficiente para criar áreas brilhantes.

**Palavras chaves:** Fotografia aérea colorida, Névoa, FDRB, Áreas brilhantes

## ABSTRACT

The non uniformity of the intensity of brightness, very common in aerial photographs, is well known in photogrammetry, and the traditional solution is the use of special filters placed on the lens. Nowadays with the increase use of color photographs, that are scanned or obtained from digital cameras, and with the use of high resolution satellite images, the matter has been studied with the goal of developing softwares and algorithms of image processing that perform the correction and automatically generate pre-processed images with uniform intensity and shades of color, for mosaicking. This paper analyzes the geometry and the physical factors that create differences in light intensity in aerial photographs, as darkening of the edges and hot spots and shows, with examples, which are almost always caused by the combined effects of vignetting, haze and sunlight. Also shows a simplified model that evaluates the haze scattering, and compares it with the effects of BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function). Simulations using this model indicate that even when the haze is imperceptible it is sufficient to create bright areas.

**Keywords:** Aerial Color Photography, Haze, BRDF, Hot Spots

## 1. INTRODUÇÃO

Existem vários fatores durante a tomada de fotografias aéreas que podem degradar a qualidade das

mesmas como nuvens e sombras de nuvens, sombras extensas de elevações topográficas ou prédios, reflexão do sol em corpos d'água, fumaça, névoa e qualidade do sistema óptico e filmes. Para cada um desses possíveis

problemas a aerofotogrametria desenvolveu métodos para contornar, evitar, ou corrigir parcialmente; com o uso de dispositivos como filtros e filmes especiais, além de um planejamento de voo adequado para cada região, época do ano e escala.

Atualmente podem ser resolvidos alguns desses problemas, como redução de nitidez pela névoa, reflexos do sol, áreas brilhantes (*hot spot*) e efeito de vinheta; pelo menos parcialmente, com programas de processamento de imagens digitais (NÓBREGA e QUINTALHA, 2004; LAMPARELLI et al, 2004; SILVA, 2007; LI et al, 2004a; IMAGEQUALIZER, 2007). Outros aspectos são mais complexos, como a eliminação de sombras de nuvens, e ainda estão sendo estudados (LI et al, 2004b).

A distribuição não uniforme de iluminação sobre o negativo é causada pelas características de construção das lentes, aliada a fatores atmosféricos que interferem na radiação que chega ao negativo. Este efeito em fotografias aéreas pode ser percebido em imagens isoladas e mais facilmente em fotoíndices e mosaicos. Na literatura, na maioria das vezes, a iluminação é atribuída apenas à vinheta, porém os fatores atmosféricos provocam efeitos que não são radialmente simétricos ao centro da fotografia, como já foi observado por (SILVA e CANDEIAS, 2008). Esta componente radiométrica externa aparece também em vãos a baixa altitude para grandes escalas, mesmo quando a névoa é pouco densa e nem é percebida pela tripulação.

Neste trabalho, é analisada a degradação radiométrica que combina o efeito puro de vinheta com fatores externos devido à Função de Distribuição da Refletância Bi-direcional (FDRB) e névoa existente na atmosfera. Este assunto possui alta relevância devido ao uso intensivo de fotografias aéreas coloridas e câmeras digitais. A degradação provoca nas bordas, além do escurecimento também um tom azulado que exige processamento especial para o balanceamento de cores na formação de mosaicos e ortofotocartas.

São ainda analisadas as diversas fórmulas que modelam os efeitos de vinheta, a função de FDRB e fórmulas simplificadas apresentadas por (HALL, 1954) para o efeito de espalhamento de névoa.

## 2. EFEITOS DE VINHETA

O efeito de vinheta é apresentado como a redução de brilho, do centro para as bordas, causado por anteparo físico aos feixes de raios que entram obliquamente em um sistema óptico (KRAUS, 1992), mas na realidade é provocado por três fatores, que serão aqui analisados, porque além do escurecimento provoca um tom azulado nas bordas das fotografias aéreas coloridas.

(WALREE, 2007) classifica o efeito de vinheta em óptico, natural e artificial.

O óptico depende do diâmetro da lente exposta, sendo mais pronunciado em aberturas maiores, portanto é dependente do número *f*. Como é

necessário usar uma abertura maior para reduzir o arrastamento em vãos para grandes escalas, o efeito é aumentado. A figura 1 mostra que uma abertura 1.4 obstrui mais os raios mais inclinados que uma abertura 5.6.



Fig. 1. O vinheta óptico é provocado pelas aberturas maiores do diafragma e pela profundidade do cone que impedem aos raios oblíquos de atingirem uniformemente todo o negativo. Adaptado de (WALREE, 2007).

O vinheta natural é a inevitável diminuição de iluminação das lentes para os raios com maior ângulo *b* (Figura 2). É inerente a cada projeto do sistema de lentes, sendo mais significativo para as lentes grandes angulares e está associado com a lei do cosseno:

$$I(b) = \cos(b)^n \quad (1)$$

Em que: *I* iluminação que atinge o negativo  
*b* ângulo entre o eixo óptico e o raio  
*n* varia de 2,5 a 4

O valor de *n* mais usual é 4 mas em aplicações práticas verifica-se que varia de 2,5 a 4 (SLATER, 1983). Pela equação 1 verifica-se que os raios com menor ângulo *b* têm maior iluminação e assim os raios mais oblíquos nas bordas têm menor.

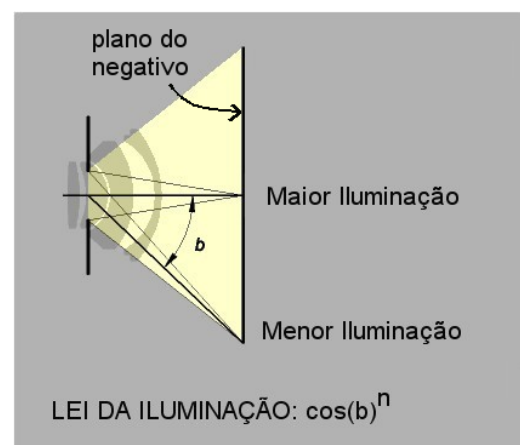


Fig. 2. O vinheta natural é provocado pela natural diminuição da iluminação que atinge o plano da imagem. Adaptado de (WALREE, 2007)

O efeito de vinheta mecânico é provocado por acessórios, como extensões colocados sobre a objetiva (Figura 3) e até por filtros, que também contribuem para que raios oblíquos não atinjam o ponto nodal anterior, agravando a vinheta óptica.

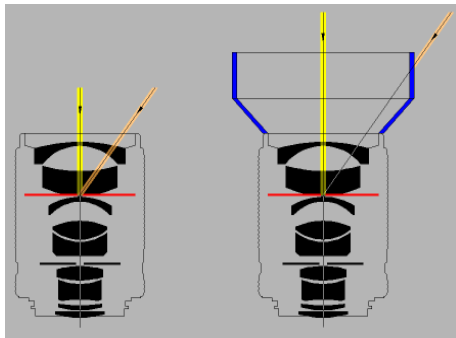


Fig. 3. Vinheta mecânico. O complemento de proteção impede os raios oblíquos de atingirem o ponto nodal anterior. Adaptado de (WALREE, 2007)

O efeito combinado das três fontes de vinheta é circular e simétrico ao centro da fotografia, sendo mais percebido em câmaras grande angulares (ângulo de abertura segundo diagonal de 75° a 100°) e super-grande angular (maior que 100°). O efeito é muito significativo nas fotografias coloridas de câmeras digitais (PAPARODITIS et al, 2006) e causa um tom azulado nas bordas (BEISL e WOODHOUSE, 2004).

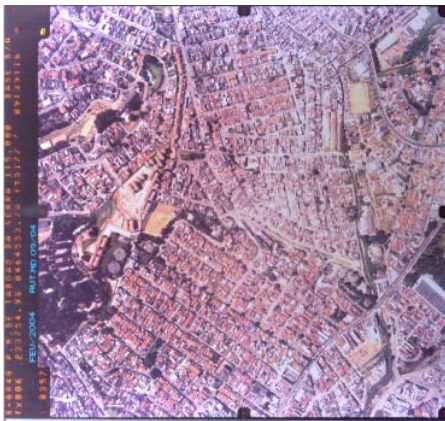


Fig. 4. Exemplo de fotografia com vinheta e tom azulado nas bordas.  
Fonte: BASE S/A

Como o efeito de vinheta é simétrico em relação ao centro da fotografia, ele pode ser corrigido matematicamente em processamento automático de imagens. O brilho  $I'$  de um ponto a uma distância radial  $r$  do PP (Ponto Principal) pode ser expresso como uma função  $G$  desta distância e do brilho original  $I$  do ponto.

$$I' = G(r, I) \quad (2)$$

Funções deste tipo foram usadas por (KRAUS, 1997; HOMMA et al., 2000;

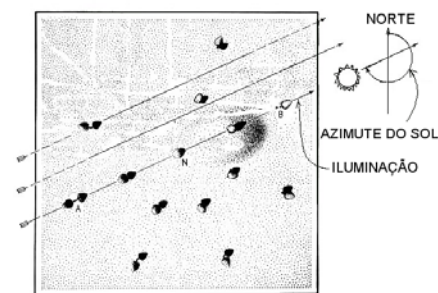
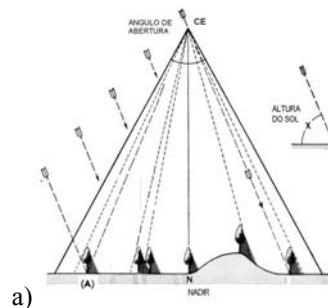
LAMPARELLI et al., 2004; GONÇALVES, 2006) para correção da iluminação em fotografias aéreas, sendo que a lei do cosseno é a função mais comum (Equação 1).

A correção em imagens digitais também pode ser realizada com processamento de balanceamento de cores e uniformização de histogramas entre as partes claras e escuras das imagens. Algumas dessas transformações estão disponíveis em programas comerciais para fotogrametria e sensoriamento remoto, mas os resultados nem sempre são satisfatórios (NÓBREGA e QUINTANILHA, 2004; WU e CAMPBELL, 2004; PAPARODITIS et al., 2006; SILVA e CANDEIAS, 2008).

### 3. EFEITOS DA RADIÂNCIA ATMOSFÉRICA NAS FOTOGRAFIAS AÉREAS

Os efeitos da radiância atmosférica nas fotografias aéreas são bem complexos. São função da altitude da câmera e outras variáveis: tipo, concentração e distribuição dos tamanhos do aerossol atmosférico, ângulo de visada do nadir; altura e azimute com relação ao sol (SLATER, 1983). Eles podem ser uniformes ou não em toda área da fotografia. Normalmente para fotografias de grandes altitudes o efeito uniforme é atribuído à névoa, e as não uniformes são relacionadas à FDRB (Função de Distribuição de Refletância Bi-direcional de superfície) e variações no tipo de névoa (PAPARODITIS et al., 2006; WU e CAMPBELL, 2004).

A Figura 5 mostra os elementos geométricos uma fotografia aérea úteis para a discussão deste trabalho. Na Figura 5a são importantes o ângulo de altura do sol indicado por setas e o ângulo de abertura da câmera e na Figura 5b o azimute do sol e a direção de iluminação em relação ao centro da fotografia.



b) Fig. 5. Geometria da iluminação solar em fotografia aérea vertical.

A seguir serão analisados esses vários efeitos em fotografias aéreas de baixa e grande altitude.

### 3.1. Iluminação uniforme da névoa

A radiação direta do sol e a luz difusa da atmosfera provocada pelo espalhamento formam a radiação global que ilumina o terreno. Um objeto no terreno absorve parte da luz incidente e devolve o restante por reflexão difusa e alguma radiação própria. A luz refletida é também sujeita a espalhamento pela atmosfera e aerossóis, o que produz a iluminação de névoa (*Haze light*) (KRAUS, 1992). O aumento da altitude da câmera ou da quantidade de partículas na atmosfera provoca um correspondente aumento na radiação atmosférica incidente sobre a câmera (SLATER, 1983), tendo como resultados a redução de contraste e a cor azulada, em fotografias de grande altitude, que podem ser minimizados colocando um filtro amarelo em frente da objetiva.

Na Figura 6 está um exemplo de fotografia com o efeito da iluminação de névoa e seu tom azulado.



Fig. 6. Fotografia com cor azulada devido presença de névoa na atmosfera.

Fonte: TOPOCART S/C

### 3.2 Áreas brilhantes

As áreas brilhantes (*hot spot*) são um efeito da não visualização das sombras em função da posição do observador em relação ao sol. Quando o sol está diretamente atrás do CE (Centro de Exposição), ou do observador, será visualizada uma grande porção da paisagem diretamente iluminada e a refletância tende a ser maior. As sombras ficam encobertas pelas próprias alturas dos objetos como prédios e árvores. Este efeito é devido a FDRB (PAPARODITIS et al. 2006; BEISL e WOODHOUSE, 2004). A Figura 7 ilustra os efeitos da iluminação direta em árvores uniformemente espaçadas, que provoca um gradiente de brilho do mais

escuro (lado do sol), ao mais claro (lado contrário), em relação ao centro da fotografia.

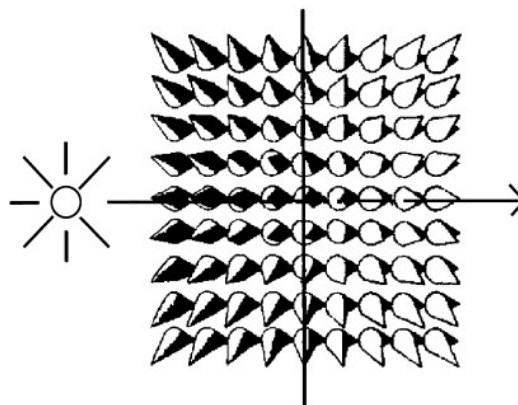


Fig. 7. A área brilhante no lado direito da figura, oposto ao sol, é devido à FDRB. (TUOMINEN e PEKKARINEN, 2004)

A FDRB avalia a refletância de uma superfície e depende da direção do fluxo irradiante e da direção de detecção do fluxo refletido (SLATER, 1980). Nesta avaliação são considerados os ângulos de altura e azimute do sol, os ângulos da superfície onde incide o fluxo, os ângulos de orientação do sensor e o comprimento de onda da luz visível. O cálculo da FDRB é complexo e são usados muitos modelos de iluminação, sendo que a maior dificuldade é a necessidade de informações sobre as refletâncias e formas dos objetos do terreno, que não estão disponíveis facilmente. Como alternativa, são usadas funções simplificadas, ou empíricas, para estimar os efeitos da FDRB em fotografias aéreas (BEISL e WOODHOUSE, 2004).

Os efeitos da FDRB têm impacto na qualidade das imagens da mesma ordem de magnitude dos efeitos atmosféricos (BEISL e WOODHOUSE, 2004) em que se inclui a névoa, conforme discussões nas seções 3.1 e 3.3.

A forma da área brilhante consiste de uma zona circular brilhante ou um pico (ASRAR, 1989; BEISL e WOODHOUSE, 2004). Em imagens verticais ela aparece sempre quando o ângulo zenital solar é menor que o ângulo de visada da câmera. Porém, como se vê na ilustração da figura 7, a área mais iluminada não define uma forma circular embora esta seja a definição dada para área brilhante. Portanto as áreas brilhantes tem contribuições de outros fatores que serão discutidos na próxima seção.

Os picos de brilho que também são comuns nas fotografias são causados pela reflexão especular do sol em corpos d'água e superfícies refletivas grandes (como telhados metálicos), e são citados também como *hot spot* na literatura, mas ocorrem entre a posição do sol e o CE, ou seja, do mesmo lado do sol na imagem. Por isso serão denominados neste trabalho de pontos de reflexão especular.

Pontos de reflexão especular aparecem quando a altura solar é maior que a metade do ângulo de abertura da câmera e a projeção do sol coincide com uma superfície refletiva. Na figura 5a ocorreria esta reflexão no ponto A. Numa câmera grande angular podem ocorrer pontos de reflexão com a altura do sol superior a 45°, por isto são necessários cuidados especiais com os vôos fotogramétricos realizados em torno do meio dia, quando o sol está mais alto. Nas fotografias das figuras 15b e 15c aparecem tanto pontos de reflexão especular como áreas brilhantes, situados em lados opostos ao centro da fotografia.

### 3.3 Efeito do Espalhamento direcional da Névoa

Embora quase sempre seja atribuída a não homogeneidade radiométrica em imagens aéreas aos efeitos da FDRB, alguns autores notam que existem outros fatores. (KRAUS, 1989) nota que fotografias tomadas nos hemisférios sul e norte apresentam sistematicamente áreas mais claras nos lados norte e sul respectivamente. (ASARAR, 1989) mostra que existe mais radiação espalhada na direção próxima à direção incidente e que esta não deve ser confundida com o efeito da área brilhante.

Para essa discussão parece bem apropriado o trabalho de (HALL, 1954), que permite identificar com bastante precisão o centro dessas áreas brilhantes, como sendo efeito do espalhamento da névoa em função dos ângulos de iluminação do sol e posição do centro da fotografia. Inicialmente se considera apenas a reflexão da luz num cubo de névoa (Figura 8). No caso de reflexão total, a luz não é absorvida e assim a quantidade de luz no sistema permanece constante, ou seja, o fluxo que atravessa a superfície fechada que envolve a fonte é constante e igual ao fluxo emitido por essa fonte. No caso de haver interesse em certa direção, a luz refletida dessa direção deve ser subtraída do fluxo total. Considerando um bloco retangular e uniforme de névoa, de comprimento  $\delta x$ , ao longo de um raio de luz, a densidade de fluxo que entra é  $E$ , a parte perdida em outras direções é  $\delta E$  e  $E - \delta E$  é o fluxo emergente.

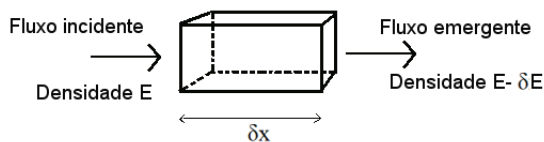


Fig. 8. Cubo de névoa

$\delta E$  é proporcional a  $\delta x$  e  $E$  e assim:

$$\delta E = -\sigma E \delta x \quad (3)$$

Considerando que  $dE$  é proporcional a  $E$  e que  $dx$  é pequena variação em  $x$ , a integração de  $dE = -\sigma E dx$  resulta em:

$$E = E_0 e^{-\sigma x} \quad (4)$$

Em que:  $E_0$  é a densidade de fluxo para  $x=0$ .

$\sigma$  é o coeficiente de espalhamento total, com unidade em  $ft^{-1}$

O valor de  $\sigma$ , estimado em  $5 \times 10^{-1} ft^{-1}$  corresponde à visibilidade diurna de 20 milhas, superior à visibilidade de 15 milhas considerada boa para aerofotogrametria (SLAMA, 1980).

Fórmulas semelhantes à equação 3, como a lei de absorção de Lambert, (SLATER, 1980), mais conhecida, adicionam ao coeficiente de reflexão  $\sigma$  um coeficiente de absorção  $\mu$ , e a soma é chamada de coeficiente de extinção. O mesmo é considerado em óptica atmosférica, na qual um pequeno volume de aerossol pode absorver uma fração de radiação e espalhar outra (Figura 9). As características ópticas de um pequeno volume de aerossol são descritas por (ASRAR, 1989):

- $K_e$  o coeficiente de extinção (em  $km^{-1}$ ), que descreve a fração da radiação extraída do raio direto pelo aerossol;
- $\omega_0$  o albedo do espalhamento simples, que é a fração do espalhamento do total da extinção;
- $f(\Phi)$ , a função de fase de espalhamento, que descreve a distribuição angular da radiação espalhada ( $\Phi$  é o ângulo de espalhamento).

As relações entre as características físicas do aerossol, coeficientes de extinção, albedo do espalhamento simples e função do espalhamento, podem ser calculadas para partículas esféricas homogêneas pela teoria de Mie.

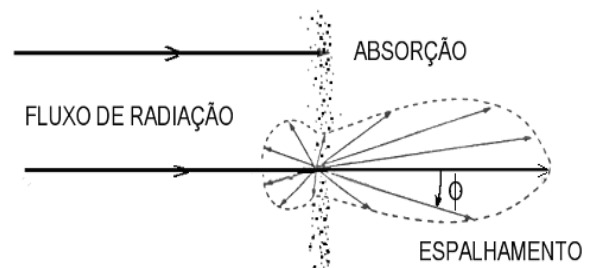


Fig. 9. Representação dos processos de espalhamento e absorção em um volume de ar. Adaptado de(ASRAR, 1989).

A função de fase do espalhamento  $f(\Phi)$  depende da densidade e características físicas das partículas e do comprimento de onda e apresenta uma forma que varia de "U" a "J" invertido. À medida que aumenta o tamanho das partículas ocorre espalhamento mais forte para frente ( $\Phi=0^\circ$ ) e um menor, porém ainda significativo, retro-espalhamento ( $\Phi=180^\circ$ ).

(HALL, 1954) adota uma curva média da função de fase de espalhamento para seus cálculos, mas são encontrados outros exemplos em (ASRAR, 1989) e (SALTER, 1983). A Figura 10 mostra curvas apresentadas em (SLATER, 1983).

A névoa é uma das fontes de partículas que formam o aerossol e enquadra-se no processo de espalhamento conhecido por Mie. A Tabela 1 mostra que as partículas de névoa encontram-se no intervalo

entre 0,1 e 10 vezes o comprimento de onda (curvas 2 a 10 na Figura 10); e que uma atmosfera completamente clara, ou atmosfera de Rayleigh, é formada apenas pelas moléculas de ar (curva 1 na Figura 10).

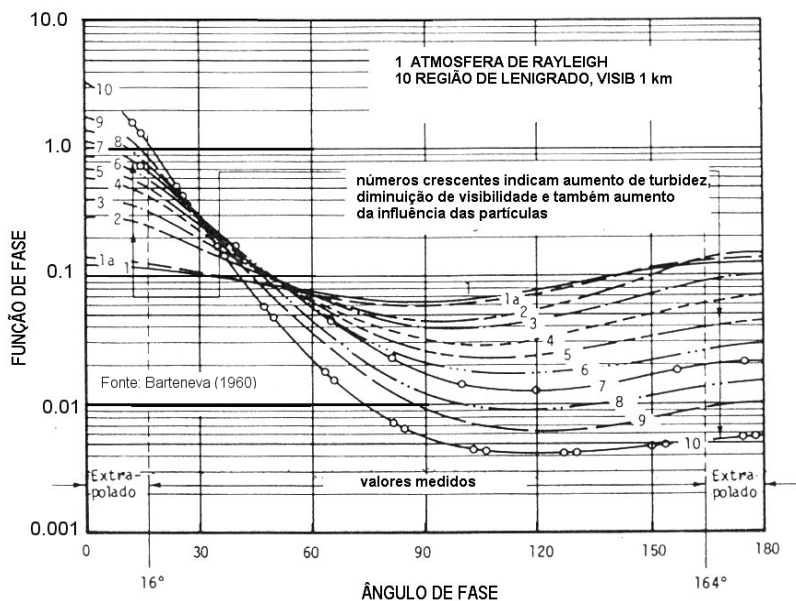


Fig. 10. Curvas de função de fase de espalhamento (SLATER, 1983)

Tabela 1. Processos de espalhamento atmosférico (SLATER, 1983).

Processo Espalhamento	Relação de comprimento de onda	Tamanho aproximado da partícula em $\lambda$	Tipos de Partículas
Rayleigh	$\lambda^{-4}$	$\ll 1$	Molécula de ar
Mie	$\lambda^0$ a $\lambda^{-4}$	0,1 a 10	Névoa, fumaça
Não seletivo	$\lambda^0$	$> 10$	Poeira, nevoeiro, nuvens

### 3.4 Relações entre os fatores de névoa e altura solar

A radiância que atinge o sensor é a soma da reflectância espectral e da excitância termal radiante da superfície, multiplicada pela transmitância espectral do percurso na atmosfera (SLATER, 1980). A este produto é adicionada a radiância espectral ascendente ao longo do percurso.

Assim a formulação apresentada por Hall contém simplificações e não leva em consideração o multi-espalhamento. Entretanto, a sua abordagem é muito esclarecedora e mostra que o fluxo, ou radiância final, é função do coeficiente de espalhamento e da distância atravessado pelo fluxo.

(HALL, 1954) usou fórmulas de G. B. Harrison para relacionar um fator de névoa com a altura do sol. Ele estima com razoável aproximação o brilho de um pulso de luz que varre o plano vertical, indicado na Figura 11, que contém o centro de exposição. Os elementos geométricos, mostrados na Figura 11, que entram nas fórmulas são:  $\theta$  ângulo zenital do sol;  $\Phi$  ângulo que um cone de névoa faz com um raio do sol;  $\beta$

ângulo de visada; CE Centro de exposição da fotografia; h altitude da fotografia.

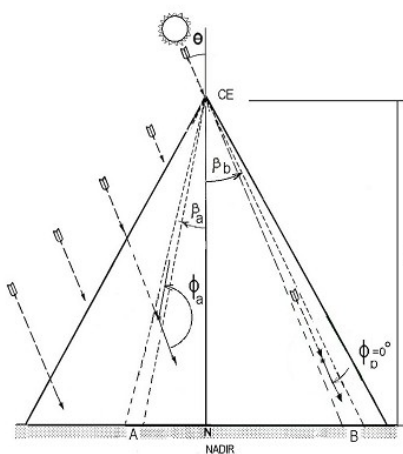


Fig. 11. Plano vertical contendo o sol e o CE (Centro de Exposição).

O fator de névoa em percentual pode ser estimado nas fotografias aéreas com:

$$H\beta = 100x \frac{(H^B\beta)}{G\beta} \quad (5)$$

em que:  $H^B\beta$  é o brilho de um cone elementar de névoa que faz um ângulo  $\beta$  com a vertical  
 $G^B\beta$  é o brilho visto através da névoa de refletor difuso branco horizontal, no solo e no nadir, interceptado pelo cone.

O brilho da névoa é dado por:

$$H^B\beta = Af(\phi) \frac{\cos\theta}{\cos\beta + \cos\theta} \left[ 1 - e^{-\sigma h(\sec\beta + \sec\theta)} \right] \quad (6)$$

Fazendo:

$$G = \frac{\cos\theta}{\cos\beta + \cos\theta} \left[ 1 - e^{-\sigma h(\sec\beta + \sec\theta)} \right] \quad (7)$$

Tem-se:

$$H^B\beta = A.f(\phi).G \quad (8)$$

O brilho no refletor branco é dado por:

$$G^B\beta = A \frac{\cos\theta}{\pi} \left[ e^{-\sigma h(\sec\beta + \sec\theta)} \right] \quad (9)$$

O fator de névoa em percentual é portanto:

$$H\beta = 100\pi f(\phi) \frac{\left[ e^{\sigma h(\sec\beta + \sec\theta)} - 1 \right]}{\cos\beta + \cos\theta} \quad (10)$$

em que A é uma constante que depende da iluminação solar.

No arranjo considerado acima se  $\beta$  diminui então  $\Phi = 180^\circ - \beta - \theta$  aumenta; e se  $\beta$  tende para  $-\theta$  então  $\Phi$  tende para  $180^\circ$ . Quando  $\Phi = 180^\circ$  a ordenada  $f(\Phi)$  tem valor máximo.

O locus de G em relação à  $\beta$  é uma curva suave com mínimo em  $\beta=0$  e simétrica em torno de OY. A curva para  $\theta=40^\circ$ ,  $\sigma=0.00005\text{ft}^{-1}$ ,  $h=16000\text{ft}$  está na figura 12. A curva mostra que ao se tomar o produto de  $f(\Phi)$  e G, ou seja,  $H^B\beta$  sem o termo A, ocorre variação brusca das ordenadas num intervalo  $\beta$  nas proximidades de  $\beta = -\theta$  e  $\Phi = 180^\circ$ , que é proporcional à luminosidade da névoa e que ilumina mais a correspondente região da fotografia.

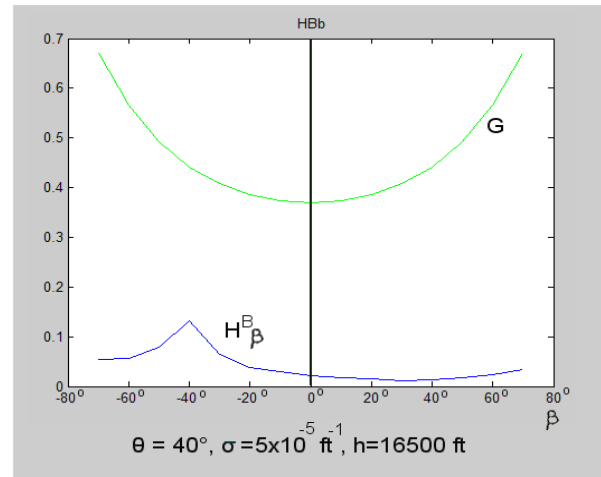
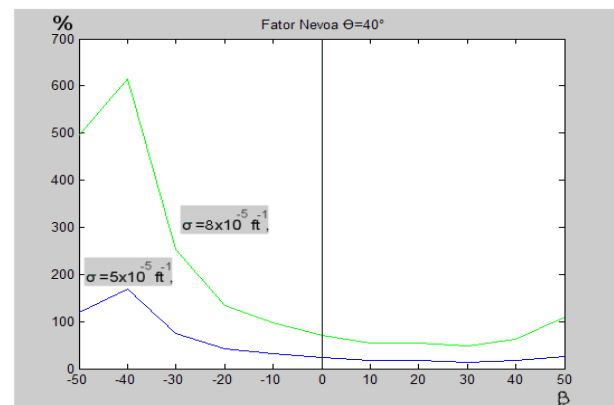
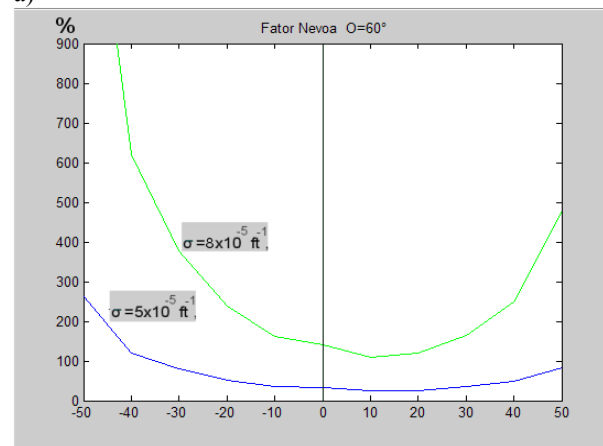


Fig. 12. Curva do brilho da névoa ( $H^B\beta$ ) com  $A=1$ ,  $\theta=40^\circ$ ,  $\sigma=0.00005\text{ft}^{-1}$ ,  $h=16000\text{ft}$

As figuras 13a e 13b mostram gráficos para comparação do fator de névoa em percentuais, calculados para  $\sigma=0.00005\text{ft}^{-1}$ ,  $\sigma=0.00008\text{ft}^{-1}$   $h=16000\text{ft}$ , ângulos  $\theta=40^\circ$  e  $\theta=60^\circ$ . Considerando que o semi-abertura da lente é  $45^\circ$ , quando  $\theta=60^\circ$  o fator máximo estaria fora da abertura. Em qualquer caso, o fator da névoa é sempre maior no lado oposto ao sol.



a)



b)

Figura 13. Curvas mostrando os fatores de névoa para  $\sigma=0.00005\text{ft}^{-1}$ ,  $\sigma=0.00008\text{ft}^{-1}$   $h=16000\text{ft}$ .  
a)  $\theta = 40^\circ$  b)  $\theta = 60^\circ$

As fórmulas foram implementadas em MATLAB e as curvas obtidas coincidem com resultados de (HALL, 1954). Mostram ainda que os picos de luminosidade coincidem com  $\beta = -\theta$  para todos os casos, mas foram notadas algumas diferenças:

- A variação em torno do pulso de maior luminosidade não é tão brusca e depende muito da forma de  $f(\Phi)$  para  $\Phi=0^\circ$ . No caso da curva usada por Hall (e também nas curvas da Figura 10) os valores menores que  $16^\circ$  e maiores que  $164^\circ$  são interpolados, pois os nefelômetros usados não medem nestes intervalos.
- Hall chama as curvas apresentadas nas figuras, e que correspondem a  $H^\beta$ , de função de espalhamento, mas função de espalhamento em seu próprio texto é  $f(\Phi)$ .

O gráfico da Figura 14 compara os efeitos das alturas  $h=3000\text{ft}$  e  $16500\text{ft}$  no brilho de névoa para  $\theta=40^\circ$ , para fator  $\sigma=0.00005\text{ft}^{-1}$  de boa visibilidade (20 milhas). Pela curva relativa a  $16500\text{ft}$  (5029m) o fator de névoa de 170% é bastante significativo. Para a altura de  $3000\text{ft}$  (914m, escala 1:6000 com câmera de 152mm) o fator de névoa é apenas 25% maior que no centro da fotografia, o que indica que não é significativo para fotografias de grande escala.

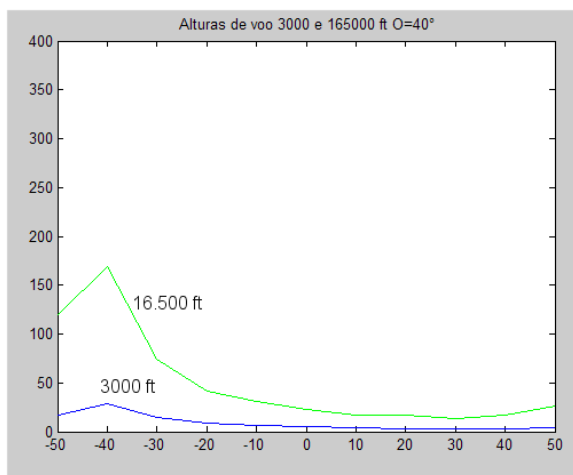


Fig. 14. Fator de névoa em percentual para  $h=3000\text{ft}$  e  $16500\text{ft}$ ,  $\theta=40^\circ$ ,  $\sigma=0.00005\text{ft}^{-1}$

Para serem avaliados e quantificados corretamente quanto da iluminação direta e refletida pelo terreno, e quanto do espalhamento e atenuação devido à névoa atingem o plano da imagem, são necessários dados astronômicos e meteorológicos precisos. Estes últimos podem ser obtidos de satélites meteorológicos, como o MODIS, para dados da visibilidade e névoa existente sobre regiões e cidades, como sugerido por (PAPARODITIS et al., 2006).

#### 4. ANÁLISES VISUAIS DE ILUMINAÇÃO NÃO-UNIFORME EM FOTOGRAFIAS

Os brilhos e fatores de névoa foram calculados na seção anterior com índices e valores indicados em (HALL, 1954) para alturas de  $3000\text{ft}$  (914m) e  $16500\text{ft}$  (5029m) de modo a confirmar os seus resultados. Estes valores foram considerados representativos para fotografias de grande e pequena escala. Nesta seção são feitas análises visuais e gráficas em algumas fotografias para localizar as áreas brilhantes, mas infelizmente pelo desconhecimento do fator de espalhamento total  $\sigma$  não é possível refazer os cálculos para uma delas, embora as posições possam ser identificadas.

O efeito do brilho mais forte da névoa na fotografia está alinhado com o centro da fotografia e no lado oposto ao sol, como no esquema da Figura 7, e pode ser notado visualmente em fotografias tomadas em várias altitudes médias de  $760\text{m}$  (2500 ft),  $3000\text{m}$  (9800 ft) e  $4500\text{m}$  (14700 ft) obtidas com câmera grande angular ( $f=152\text{mm}$ ), correspondentes às escalas 1:5000, 1:20000 e 1:30000, respectivamente, agrupadas na Figura 15.

A partir das datas e horários aproximados em que foram tomadas foram calculados a altura e azimute do sol, listados na Tabela 2.

Tabela 2. Informações sobre as fotografias e dados calculados de altura e azimute do sol

Fotografia	Escala	Data	Horário	Altura do Sol	Azimute do Sol
1- B848 fx006 n. 357	1/5000	13/02/2004	12:40	$50,6^\circ$	$82,4^\circ$
2- 0728 fx014 n.069	1/20000	09/12/2000	15:30	$55,0^\circ$	$263,0^\circ$
3- 0748 fx001 n.021	1/30000	31/08/2001	11:45	$58,1^\circ$	$10,5^\circ$
4- 0748 fx002 n. 024	1/30000	01/09/2001	11:52	$58,0^\circ$	$8,5^\circ$

Os dados calculados foram lançados sobre as fotografias usando uma grade que considera a direção do vôo sendo exatamente L-O e a convergência meridiana no centro da foto nula. Para indicar a altura do sol foram traçados círculos a partir do centro, com raios em intervalos equivalentes a  $10^\circ$ , sendo o mais interno de  $80^\circ$ . Para comparar os resultados dos gráficos

com o ângulo zenital  $\theta$  da Figura 11, com altura solar, basta lembrar que um é o complemento do outro.

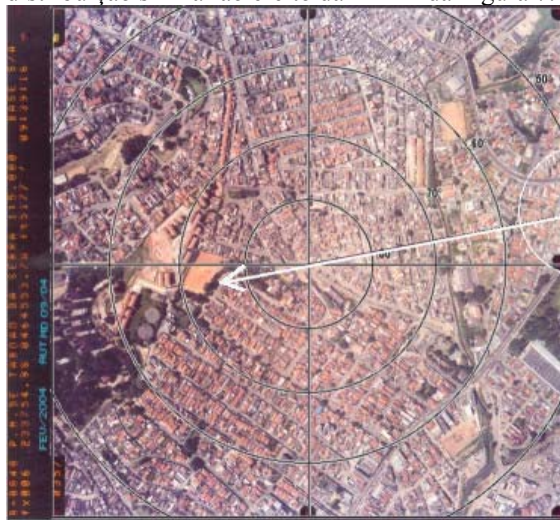
Os azimutes calculados com as informações de cada fotografia foram comparados com os azimutes das sombras existentes nas fotografias, como sugerido na Figura 5b. Simplesmente foram traçadas linhas paralelas às sombras de prédios ou árvores, e depois outra pelo



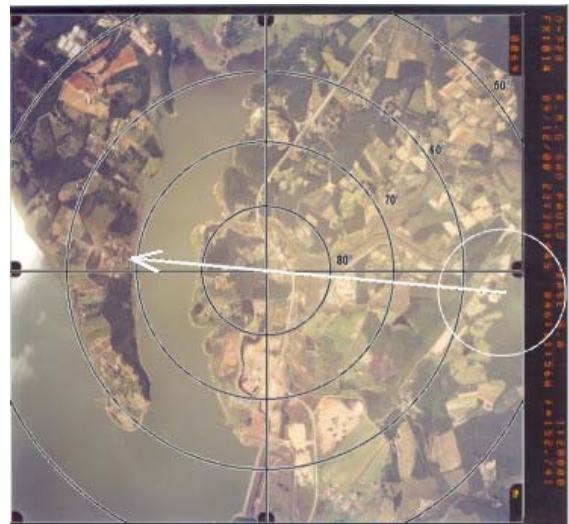
centro da fotografia. Podem ser percebidas diferenças de vários graus, mas os erros podem ser atribuídos às inclinações das fotografias e às direções de voo diferentes de L-O, e assim foram considerados suficientemente adequados à finalidade deste trabalho. Nas figuras os azimutes estão indicados por linhas brancas, a posição do sol por seta e as áreas mais brilhantes estão marcadas com círculos, cujos centros estão em posições correspondentes aos ângulos calculados da altura do sol.

No caso da fotografia 1 (Figura 15a) com altura do sol de  $50,6^\circ$ ; o centro do círculo ficou um pouco além da borda, mas percebe-se toda a área mais brilhante cobrindo o lado direito. Nas fotografias 2 e 3 (Figuras 15b, 15c) aparecem também, nitidamente, na posição de projeção do sol, reflexos especulares em corpos d'água. Na fotografia 3 (Figura 15c) aparece ainda, abaixo da marca fiducial superior, uma reflexão intensa da vegetação do campo, fenômeno que é mais raro de ser registrado em fotografias aéreas porque depende essencialmente do tipo e posições das folhas em relação ao sol.

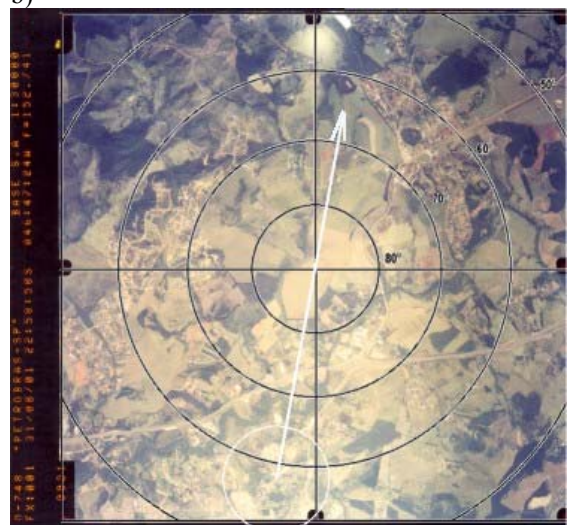
De modo geral, as áreas brilhantes percebidas nas fotografias coincidem com as posições previstas pelos gráficos gerados pelas fórmulas 6 a 10, ou seja, as áreas brilhantes têm seus centros no lado oposto ao sol, em relação ao centro da câmera, e com mesmo ângulo da altura solar, o que se percebe bem nas Figuras 15c e 15d. No caso das fotografias de escala 1:5000 e 1:20000 (Figuras 15a e 15b) as áreas brilhantes não são concentradas e cobrem uma metade da fotografia, em distribuição similar ao efeito da FDRB da Figura 7.



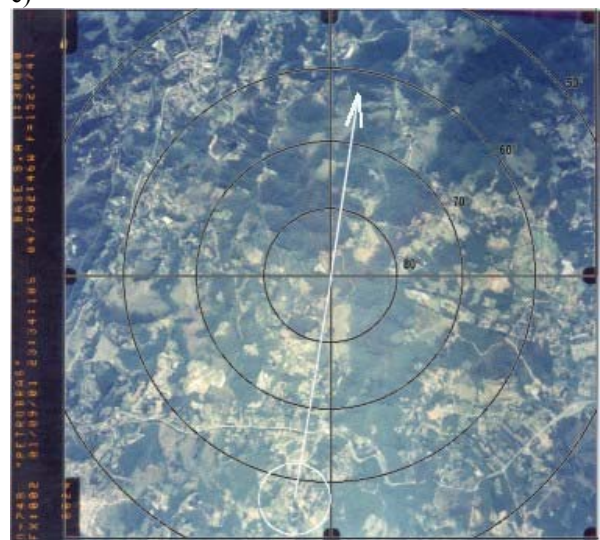
a)



b)



c)



d)

Fig. 15. Fotografias com as áreas brilhantes marcadas com círculo, direção do sol por seta. a) Fotografia 1: escala 1/5.000; b) Fotografia 2: escala 1/20.000; c) Fotografia 3: escala 1/30.000; d) Fotografia 4: escala 1/30000.

## 5. CONCLUSÕES

As causas da não uniformidade de iluminação das fotografias aéreas foram analisadas com os objetivos de esclarecer definições usadas correntemente na literatura para os fenômenos das áreas brilhantes (*hot spots*) e de reflexão especular; e como subsídio para processamento automáticos de uniformização de cores em imagens isoladas ou em mosaicos.

Foi usado um modelo simplificado que permite localizar e avaliar a intensidade de áreas brilhantes como resultado do espalhamento da névoa, combinado com certas direções da iluminação solar. Também foram analisadas as variações de iluminação em algumas fotografias de várias escalas, do que se pode concluir o seguinte:

- Confirma-se visualmente que a não uniformidade de iluminação das fotografias decorre da combinação de efeitos atmosféricos e da vinheta e não apenas da vinheta como é comumente atribuído.
- As áreas brilhantes das fotografias, consideradas normalmente como resultado da reflectância bi-direcional (FRDB), também podem ser intensificadas pelo espalhamento mais forte do fluxo de luz solar, ao atravessar a névoa existente na atmosfera, dentro do cone de abertura de visada da câmera .
- Exemplos mostrados estabelecem claramente as diferenças entre áreas brilhantes e áreas de reflexão especular, que têm causas diferentes e são muitas vezes chamadas pelo mesmo nome.

Para se determinar a influência proporcional na iluminação não-uniforme em fotografias aéreas devido a BRDF e ao espalhamento da névoa, é necessário que se disponha de dados precisos de campo e atmosféricos. Como os modelos são complexos, é assunto a ser melhor estudado, para que seja encontrada uma forma mais prática e capaz de ser usada em processos de correção e balanceamento de cores de imagens digitais em aerofotogrametria, mapeamento com ortofotocartas e imagens de satélites de alta resolução.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas BASE Aerofotogrametria e Projetos S.A e TOPOCART Topografia e Engenharia S/C; pelas fotografias e informações essenciais à execução desta pesquisa.

## REFERENCIAS

ASRAR, GHASSEM (ed). **Theory and Applications of Optical Remote Sensing**. New York: John Wiley & Sons. 1989. il. 734 p.

BEISL, U; WOODHOUSE, N. **Correction of Atmospheric and Bidirectional Effects in Multispectral ADS40 Images for Mapping Purposes**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. 34 Part XXX. ISPRS Istanbul CD-ROM. 2004.

GONÇALVES, GLAUBER A. **Detecção Automática de Alterações na Cartografia Cadastral com Base em Imagens de Câmaras Digitais**. Tese doutorado. Curitiba: Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. 2006

HALL, R. **The Effect of Haze and High Solar Altitude on the Density of Air Survey Negatives**. Photogrammetric Record. v. 1. n. 4. p. 20-37. 1954.

HOMMA, KOHZO; YAMAMOTO HIROMICHI; IWATA, YOSHITAKA. **A Study on Image Restoration for Airborne Cameras**. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. 33 part B7. Proceedings XIXth Congress ISPRS Amsterdam CD-ROM. 2000.

IMAGEQUALIZER. Catálogo disponível em <http://gi.leica-geosystems.com/LGISub1x134x0.aspx>. acesso em 29.09.2007.

KRAUS, KARL. **Photogrammetry**. Bonn: Dümmler. Volume 1 397 p. 1992.

KRAUS, KARL. **Photogrammetry**. Bonn: Dümmler. Volume 2. 466 p. 1997.

LAMPARELLI, RUBENS AUGUSTO C; ROCHA, JANSLE V; JAIME, ANDRÉS L. G. **Correção Radiométrica de Imagens Digitais Aéreas para o Efeito Vinhete**. Revista Brasileira de Cartografia. N. 56. v. 01. p. 65-74. 2004.

LI, ZH J; ZHANG, Z.X; ZHANG J. Q. **Dodging in Photogrammetry and Remote Sensing**. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. 34 Part B5. Proceedings XIXth Congress Istanbul CD-ROM. 2004a.

LI, YAN; SASAGAWA, T; GONG, PENG. **A System of the Shadow detection and Shadow Removal for High Resolution City Aerial Photo**. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. V.35 Part B3. Proceedings XIXth Congress Istanbul DVD. 2004b.

MCGLONE, J. C.(Ed). **Manual of Photogrammetry** (5th Edition). Bethesda, Maryland, EUA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 1151 p. 2004.

NÓBREGA, RODRIGO A. A; QUINTANILHA JOSÉ A. **Comparative Analysis of Automatic Digital Image Balancing and Standard Histogram Enhancement Techniques in Remote Sensing Imagery.** Revista Brasileira de Cartografia. N. 56. v. 01. p. 55-64. 2004.

PAPARODIS, NICOLAS; SOUCHOU, JEAN-PHILIPPE; MARTINOTY GILLES; DESEILLINY , MARE PIERROT. **High-end Aerial Digital Cameras and their Impact on the Automation and Quality of the Production Workflow.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. V. 60, n. 6. p. 400-412. 2006.

SILVA, D. C; CANDEIAS, A. L. B. **Restoration of Non Uniform Illumination in Color Aerial Photographs.** Boletim de Ciências Geodésicas. Curitiba: UFPR. V.14, n.3. 2008.

SLATER, PHILIP N. **Remote Sensing, Optics and Optical Systems.** Massachusetts: Addison-Wesley Publishing. il. 575 p. 1980.

SLATER, PHILIP N (Ed). **Photographic Systems for Remote Sensing** (Chap 6) . In: Manual of Remote Sensing 2nd edition. V.1. American Society of Photogrammetry. 1983.

TUOMINEN, SAKARI; PEKKARINEN, ANSSI. **Local radiometric correction of digital aerial photographs for multi source forest inventory.** Remote Sensing of Environment. n. 89, p. 72–82. 2004

WALREE, PAUL VAN. **Website about Photographic Optics.** Disponível em <http://www.vanwalree.com/optics/vignetting.html> acesso em 25.09.2007.

WU, XIAOLIANG E CAMPBELL, NORM. **A Colour-Balancing Method and its Applications.** The 12 th Australasian Remote Sensing and Photogrammetric Conference Proceedins. Fremantle, Western austrialia, 2004.