

## Correção de distorção projetiva em imagens obtidas com câmera a bordo de VANT

Leandro Roberto<sup>1,2</sup>  
Sidney Andrade de Lima<sup>1,2</sup>  
Sidnei João Siqueira Sant'Anna<sup>2</sup>  
Elcio Hideiti Shiguemori<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Estudos Avançados - IEAv  
Caixa Postal 6044 - 12228-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{leandrolr, sidneysal, elcio}@ieav.cta.br

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
sidnei@dpi.inpe.br

**Abstract.** This paper presents a correction technique for the geometric distortion that affects images from cameras aboard UAV when in off-nadir conditions. This kind of lightweight platform is extremely susceptible to turbulences, and often does not have a gyro stabilized gimbal to keep camera pointed to nadir, so it is common to occur off-nadir extrapolations with significant effects on the image geometry. So, when you want to extract reliable metric information from the image or to enable accurate matching in a Geographic Information System – GIS in order to perform fusion or geoprocessing, this distortion must be known and corrected. Among the various existing correction methods, we present here the parametric approach that uses the collinearity equations, that requires camera external orientation parameters. We present all mathematical formulations for the correction, definitions of camera geometric parameters and how to calculate them. Another important contribution of this paper is the demonstration of difference between the *roll-pitch-yaw* angles commonly used in aeronautical systems, and the *omega-phi-kappa* angles commonly used in photogrammetric systems. People may make some confusion about that when extracting UAV data to be used in photogrammetry software. We present clear definition of reference axes and rotation angles for each system and the mathematical development to perform conversion. For practical demonstration, we applied these techniques to some off-nadir images from a small-format camera on a fixed-wing UAV with known position and attitude angles and. Thus, we were able to perform image resampling to correct the projective distortion.

**Palavras-chave/Keywords:** photogrammetry, remote sensing, geometric correction, image processing, fotogrametria, sensoriamento remoto, correção geométrica, processamento de imagens.

### 1. Introdução

Com o advento de novas tecnologias como Veículos Aéreos Não Tripulados – VANTs, drones e câmeras digitais de alta resolução compactas, muitas aplicações de imageamento surgiram com custo acessível e facilidade de operação. Diante desses fatos, vários setores da sociedade científica, militar e produtiva no Brasil estão voltando os olhos para essa nova realidade e criando diversas soluções para mapeamento, monitoramento, rastreamento, fiscalização e detecção de alvos específicos. Uma aplicação que merece destaque é a navegação de VANT por reconhecimento automático de imagem, ou seja, determinação de sua posição exclusivamente a partir de imagens geradas por um sensor a bordo, Shiguemori (2008).

O VANT consiste de uma plataforma aérea que pode ser operada remotamente, de forma semi-autônoma ou totalmente autônoma, geralmente portando uma câmera fotográfica digital. Possui *Global Navigation Satellite System - GNSS* para fornecer solução de posicionamento geográfico geralmente em conjunto de um *Inertial Measurement Unit – IMU*, composta de giroscópios, acelerômetros, barômetro e magnetômetro, de onde pode-se extrair ângulos de atitude para a orientação exterior das imagens tomada durante o voo

Assim como as imagens de sensores orbitais, as obtidas em VANTs também possuem distorções geométricas, embora com magnitudes e naturezas diferentes. Assim, para obtenção de informações métricas confiáveis a partir da imagem, ou então para registrá-la em um

Sistema de Informação Geográfica - SIG para, por exemplo, realizar fusão de imagens ou geoprocessamento, é mandatório que estas distorções sejam conhecidas e corrigidas.

Diversos são os fatores que afetam a distorção geométrica das imagens, sendo divididos em internos, aqueles relacionados com a arquitetura da câmera, e externos, nos quais se enquadra a distorção projetiva, Mikhail *et al* (2001). Ela ocorre quando a imagem é obtida com visada oblíqua, ou seja, *off-nadir*, Figura 1a. O efeito na imagem é a perda de proporção e paralelismo, de modo que objetos distantes aparecem menores e fechados. Os quadrados aparecem como trapézios e os círculos como elipses. Para a correção desta distorção, é necessário o conhecimento da orientação exterior da câmera, ou seja, sua posição e seus ângulos de apontamento em relação ao sistema de referência da cena.

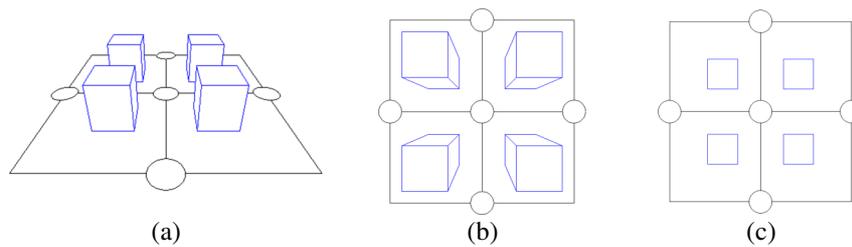


Figura 1. (a) Imagem com perspectiva - visada oblíqua (*off-nadir*), (b) imagem com visada do nadir e (c) imagem ortogonal.

A rigor, toda imagem aérea possui distorção projetiva, mesmo com visada do nadir, devido ao fato dos raios de luz provenientes do objeto convergirem para um único ponto no sensor, o centro de perspectiva. Ou seja, a imagem não representa uma projeção ortogonal do terreno quando há variações de altitude que geram perspectiva, como mostrado na Figura 1b. A correção da perspectiva em imagens verticais (visada nadir) é feita pelo processo de ortorretificação, Mikhail *et al* (2001), que também usa os princípios de colinearidade a fim de tornar a imagem ortogonal, conforme Figura 1c.

O ideal na tomada de uma imagem aérea é que a visada seja o mais próxima do nadir, a fim de minimizar a distorção projetiva, tanto que em levantamentos fotogramétricos para geração de ortofotomosaicos e modelo digital de superfície, a tolerância angular é de 3 graus. No entanto, os VANTs, por serem leves, são extremamente susceptíveis a rajadas e turbulências, e nem sempre possuem plataformas gimbal giro estabilizada para manter visada nadir, principalmente os de asa fixa, de modo que apresentam extrapolações *off-nadir* consideráveis. A Figura 2 mostra os efeitos das atitudes (*roll*, *pitch* e *yaw*) de uma plataforma aérea na distorção da imagem da superfície terrestre.

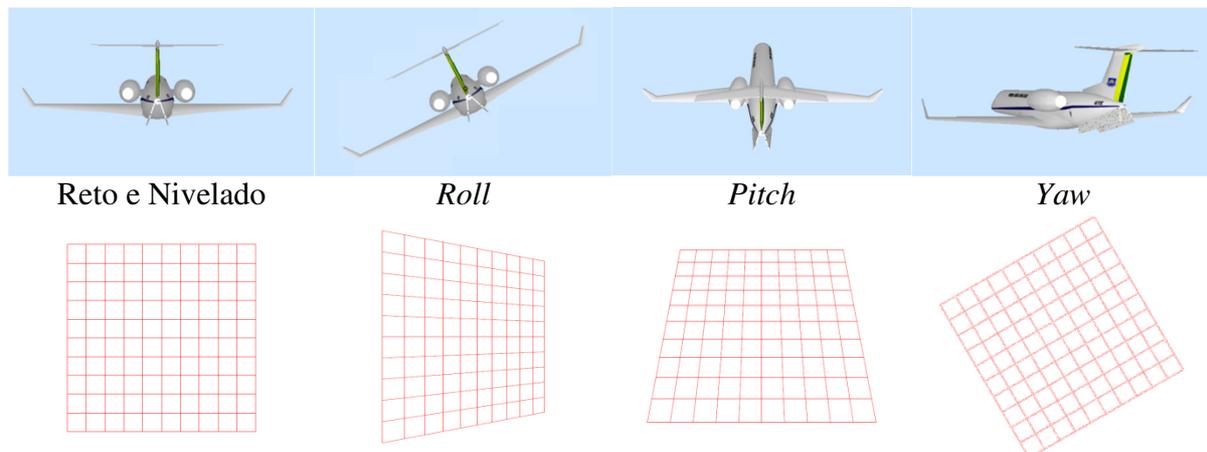


Figura 2. Efeitos das atitudes de *roll* *pitch* e *yaw* da aeronave na geometria da imagem da superfície terrestre em comparação com a aeronave nivelada e câmera com visada nadir.

Há várias abordagens para a correção da distorção projetiva, como a transformação linear direta, a transformação afim polinomial, a transformação fotogramétrica, dentre outras. Conforme analisado por Lima e Brito (2006), a abordagem fotogramétrica é a que apresenta menor erro, pois usa o próprio modelo de projeção da câmera, ou seja, considera o princípio das equações de colinearidade. Para isso, são necessários os parâmetros de orientação externa, ou seja a posição da câmera ( $E_C, N_C, U_C$ ) e de seus ângulos de apontamento  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$  ( $\kappa, \omega, \phi$ ) em relação ao sistema de referência terrestre *East, North, Up* – ENU.

O problema é que os ângulos de atitude *roll, pitch* e *yaw* ( $\phi, \theta, \psi$ ), fornecidos pelo sistema de navegação do VANT, seguem a definição aeronáutica e são completamente diferentes dos utilizados nos modelos fotogramétricos. A conversão de uma para outra não é simples, ou seja, não basta trocar sinal, porque a sequência e o sentido das rotações são diferentes. O conhecimento disso é fundamental porque a maioria dos softwares fotogramétricos utilizados para geração de ortofotomosaicos e modelo digital de elevação utiliza a definição fotogramétrica ou fornecem opção para ambos, devendo o usuário saber discernir.

Este trabalho aborda em detalhe a formulação matemática para a correção de distorção geométrica projetiva pelo método fotogramétrico e a aplicação em imagens obtidas por uma câmera de pequeno formato a bordo de um VANT de pequeno porte. Outra contribuição deste trabalho foi a apresentação de formulação matemática desenvolvida para a conversão dos ângulos *roll-pith-yaw*, definidos no sistema aeronáutico, para os ângulos *omega-phi-kappa*, definidos no sistema fotogramétrico. Também são apresentadas as definições dos parâmetros geométricos como distância focal, tamanho de sensor, FOV, IFOV, GSD, dentre outros.

## 2. Metodologia

### 2.1 Equipamentos, Aquisição e Processamento de Dados

O VANT utilizado para o levantamento das imagens foi o Echar 20B da fabricante brasileira Xrobots, Figura 3a, tipo asa fixa com sistemas GNSS e IMU para gerar e registrar parâmetros de navegação como posição e ângulos de atitude (*roll, pitch* e *yaw*). O parâmetro designado como *yaw* aqui refere-se à proa magnética, uma vez que foi obtido pelo magnetômetro a bordo.



Figura 3. (a) Echar 20B e (b) câmera Canon Rebel T31, usados na aquisição das imagens.

A câmera de bordo foi uma Canon Rebel T3i EOS 600D, Figura 3b, tipo DSLR frame, com sensor CMOS de pequeno formato (22.3 x 14.9 mm) de 18MP e distância focal de 18mm. Estava fixa na estrutura do VANT, ou seja, não havia sistema gimbal giroestabilizador para compensar os movimentos angulares. A altura média de voo foi de 300m, o que resultou em um *Ground Sample Distance* - GSD de 7cm. O *software* utilizado para implementar os algoritmos de correção geométrica e de conversão angular foi o Matlab v7.11 R2010b. O método de interpolação usado na reamostragem das imagens foi o do vizinho mais próximo.

### 2.2 Definição dos Sistemas Aeronáutico e Fotogramétrico

Os sistemas de navegação a bordo de veículos aéreos utilizam como referência um sistema de eixos ( $X_a, Y_a, Z_a$ ) fixos no corpo com origem no centro de gravidade, conforme Figura 4a, Farrell e Barth (1998). Já o sistema fotogramétrico baseia-se no sistema de referência da câmera de eixos ( $X_m, Y_m, Z_m$ ) fixos no corpo, com origem no centro de

perspectiva, conforme Figura 4b, Wolf (1985). Assim, quando a câmera é fixada e alinhada na aeronave, os eixos não coincidem, ou seja,  $X_m$  corresponde a  $Y_a$ ,  $Y_m$  a  $X_a$  e  $Z_m$  a  $-Z_a$ , conforme Figura 4b. O sistema de referência terrestre é o ENU, definido sobre um plano topográfico local com eixo da abscissa no sentido leste, eixo da ordenada no sentido norte e eixo da vertical local com sentido para cima.

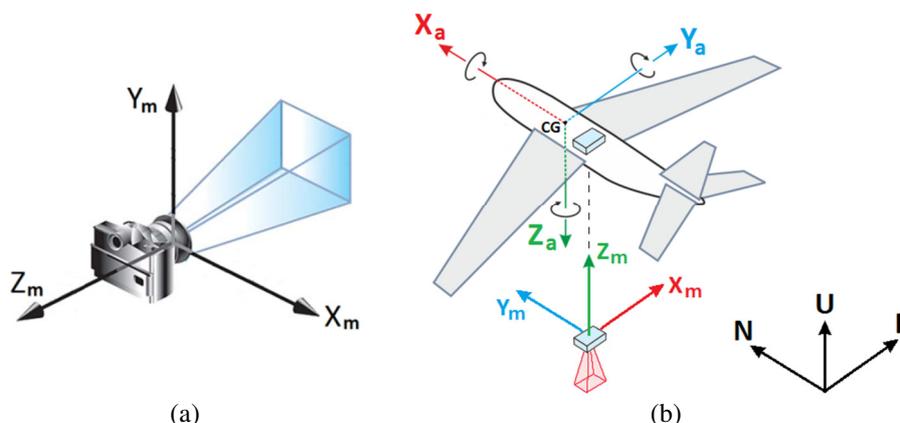


Figura 4. (a) Sistema fotogramétrico e (b) sistema aeronáutico em relação ao ENU.

Os ângulos  $\phi$ ,  $\theta$  e  $\psi$  transformam o sistema do VANT para o sistema ENU e são definidos como rotações positivas em torno dos eixos  $X_a$ ,  $Y_a$  e  $Z_a$ , respectivamente, conforme definição do sistema de navegação aeronáutica, Figura 5a, Etkin e Reid (1996). O ângulo  $\psi$  frequentemente é chamado de “yaw” por se referir ao movimento em torno do eixo  $Z_a$ , mas conceitualmente trata-se da proa magnética, ângulo formado pela projeção do eixo longitudinal do VANT no plano topográfico com a direção do norte magnético, já que é o valor medido pelo magnetômetro a bordo, devendo ser corrigido ainda pela declinação magnética para se ter referência ao norte verdadeiro.

Os ângulos  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$  transformam o sistema ENU para o da câmera e são definidos como rotações positivas em torno dos eixos  $X_m$ ,  $Y_m$  e  $Z_m$ , respectivamente, conforme definição do sistema fotogramétrico, Figura 5b, Wolf (1985).

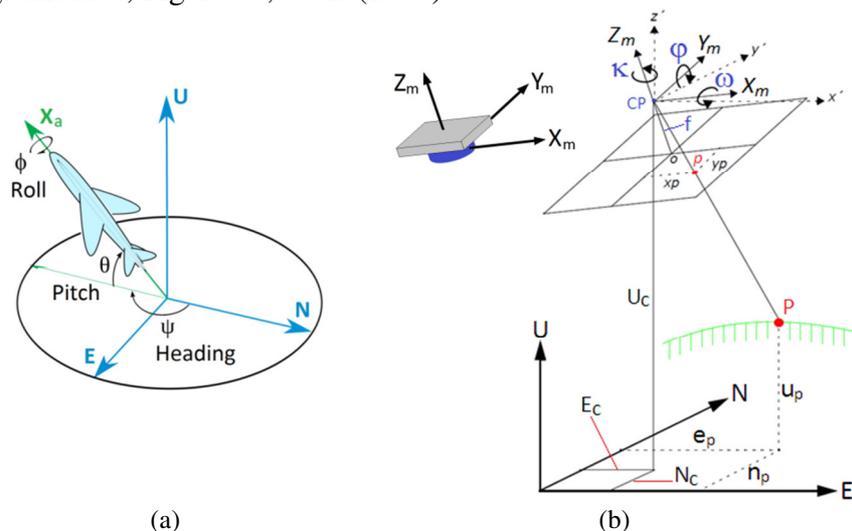


Figura 5. (a) Ângulos de rotação do sistema aeronáutico e (b) no sistema fotogramétrico.

### 2.2.1 Mudança de Referencial

A transformação das coordenadas do sistema de referência terrestre local ENU para as correspondentes XYZ no sistema aeronáutico ou no fotogramétrico é feita por meio dos parâmetros de orientação externa, ou seja, a posição da câmera ( $E_c$ ,  $N_c$  e  $U_c$ ) e seu

apontamento angular. Basicamente, trata-se de uma mudança de referencial através de uma translação (matriz T) e de rotações (matriz R), conforme Equações 1 a 2, que consideram um modelo de câmera *pinhole* ideal, sem distorções internas. A Equação 3 é equivalente à 1.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [R_{3 \times 3} \quad T_{3 \times 1}] \begin{bmatrix} E \\ N \\ U \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1) \quad T = -R \begin{bmatrix} E_c \\ N_c \\ U_c \end{bmatrix} \quad (2) \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} E - E_c \\ N - N_c \\ U - U_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para o sistema aeronáutico, a sequência das rotações nos eixos para transformação do ENU para o  $X_a Y_a Z_a$  é primeiro  $\psi$ , depois  $\theta$  e por último  $\phi$ , conforme Equações 4 a 6, resultando na matriz de rotação designada por A, Equação 7. A transformação inversa pode ser feita facilmente pela transposta da matriz de rotação, pois ela tem a propriedade de ser ortogonal, ou seja  $A^{-1} = A^T$ .

$$R_\psi = \begin{bmatrix} -\sin\psi & -\cos\psi & 0 \\ \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4) \quad R_\theta = \begin{bmatrix} -\cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & -\cos\theta \end{bmatrix} \quad (5) \quad R_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A = R_\phi R_\theta R_\psi = \begin{bmatrix} \sin\psi \cos\theta & \cos\psi \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\psi \sin\theta \sin\phi + \cos\psi \cos\phi & \cos\psi \sin\theta \sin\phi - \sin\psi \cos\phi & -\cos\theta \sin\phi \\ \sin\psi \sin\theta \cos\phi - \cos\psi \sin\phi & \cos\psi \sin\theta \cos\phi + \sin\psi \sin\phi & -\cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para o sistema fotogramétrico, a sequência das rotações nos eixos para transformação do ENU para o  $X_m Y_m Z_m$  é primeiro  $\omega$ , depois  $\phi$  e por último  $\kappa$ , conforme Equações 8 a 10, resultando na matriz de rotação designada por M, Equação 11. A inversa pode ser feita também pela transposta da matriz de rotação, pois  $M^{-1} = M^T$ .

$$R_\kappa = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \sin\kappa & 0 \\ -\sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8) \quad R_\phi = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (9) \quad R_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \sin\omega \\ 0 & -\sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$M = R_\kappa R_\phi R_\omega = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\kappa & \cos\omega \sin\kappa + \sin\omega \sin\phi \cos\kappa & \sin\omega \sin\kappa - \cos\omega \sin\phi \cos\kappa \\ -\cos\phi \sin\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \sin\omega \sin\phi \sin\kappa & \sin\omega \cos\kappa + \cos\omega \sin\phi \sin\kappa \\ \sin\phi & -\sin\omega \cos\phi & \cos\omega \cos\phi \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 2.2.2 Conversão Omega-Phi-Kappa ↔ Roll-Pitch-Yaw

Conforme comentado, os dados de orientação fornecidos pela IMU do VANT são definidos no sistema de referência aeronáutico, enquanto que os modelos que representam a imagem utilizam os dados no sistema de referência fotogramétrico, daí a necessidade de se realizar a conversão. Isso é feito fazendo a correspondência entre os sistemas, conforme a Equação 12, que é equivalente à Equação 13, onde  $a_{ij}$  são os elementos da matriz A e  $m_{ij}$  os da matriz M, os quais possuem os ângulos de interesse implicitamente que, quando extraídos, resultam nas equações 14 a 19.

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_a \\ x_a \\ -z_a \end{bmatrix} \quad (12) \quad \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ -a_{31} & -a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\theta = \text{atan2} \left( m_{23}, \sqrt{m_{13}^2 + m_{33}^2} \right) \quad (14) \quad \phi = \text{atan2} \left( \frac{-m_{13}}{\cos\theta}, \frac{m_{33}}{\cos\theta} \right) \quad (15) \quad \psi = \text{atan2} \left( \frac{m_{21}}{\cos\theta}, \frac{m_{22}}{\cos\theta} \right) \quad (16)$$

$$\phi = \text{atan2} \left( -a_{31}, \sqrt{a_{32}^2 + a_{33}^2} \right) \quad (17) \quad \omega = \text{atan2} \left( \frac{a_{32}}{\cos\phi}, \frac{-a_{33}}{\cos\phi} \right) \quad (18) \quad \kappa = \text{atan2} \left( \frac{-a_{11}}{\cos\phi}, \frac{a_{21}}{\cos\phi} \right) \quad (19)$$

### 2.3 Sistema da Imagem

Todos os pontos que compõem o objeto podem ser representados no espaço imagem bidimensional pelo princípio da colinearidade. Para objetos suficientemente distantes da

câmera, a imagem forma-se no plano focal, ou seja, os pontos assumem coordenada Z igual à distância focal f no sistema da câmera. Assim, para uma câmera solidária e alinhada à aeronave, conforme Figura 4b, a representação das coordenadas no sistema imagem deriva da Equação 3 e é dada pela Equação 20, quando utilizada a transformação pelo sistema aeronáutico, Figura 6a, ou pela equação 21, quando pelo sistema fotogramétrico, Figura 6b. Os parâmetros  $\lambda_a$  e  $\lambda_m$  são fatores de proporcionalidade.

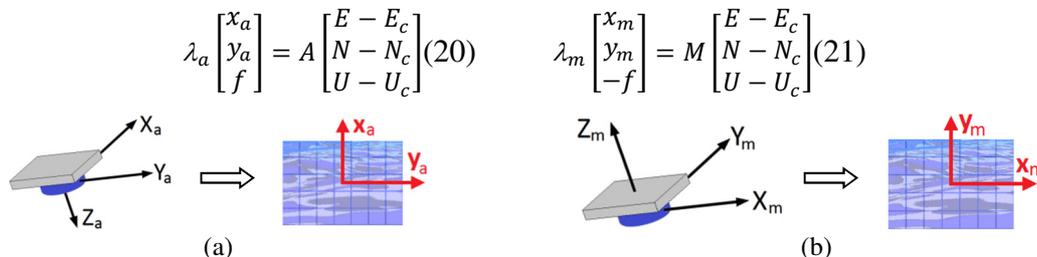


Figura 6. (a) Sistema da imagem quando utilizado sistema aeronáutico e (b) quando utilizado sistema fotogramétrico.

### 2.3 Parâmetros Geométricos da Câmera

Para a correção geométrica das imagens foi necessário o conhecimento de alguns parâmetros da câmera, uns extraídos do manual e outros calculados. A Figura 7 apresenta a definição de cada um deles e as equações seguintes expressam a forma como foram obtidos.

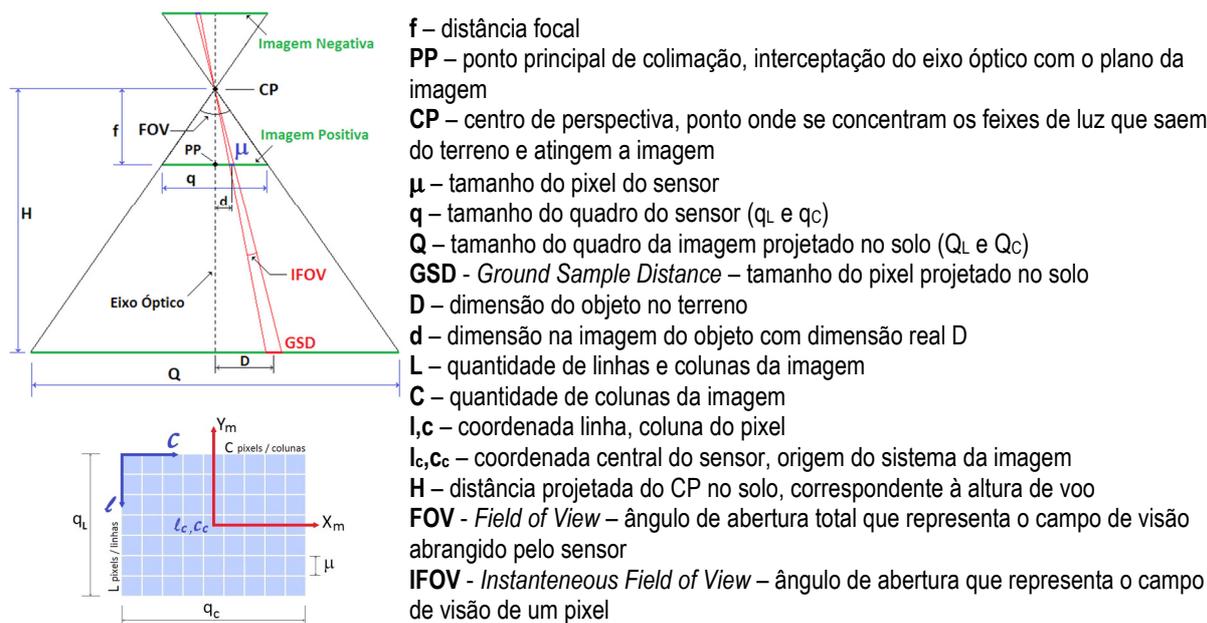


Figura 7. Parâmetros geométricos do modelo de câmera *pinhole*.

Da geometria da figura podem ser extraídas as relações matemáticas para obtenção dos parâmetros geométricos, conforme equações 22 a 29. Referem-se a modelo simplificado de câmera *pinhole* isenta de distorções internas, com visada nadir. Para obtenção das coordenadas dos pixels no sistema  $X_a, Y_a$  ou no  $X_m, Y_m$ , a partir das coordenadas no sistema linha-coluna, usa-se a transformação afim dada pela Equação 30 ou 31, respectivamente.

$$\mu = \frac{q_L}{L} = \frac{q_C}{C} \quad (22)$$

$$\tan\left(\frac{FOV}{2}\right) = \frac{q}{2f} = \frac{Q}{2H} \quad (23)$$

$$GSD = \frac{\mu \cdot H}{f} \quad (24)$$

$$D = \frac{H}{f} \cdot d \quad (25)$$

$$f_{35} = f \cdot crf \quad (26)$$

$$crf = \frac{43.267}{\sqrt{q_L^2 + q_C^2}} \quad (27)$$

$$l_c = \left(\frac{L+1}{2}\right) \quad (28)$$

$$c_c = \left(\frac{C+1}{2}\right) \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ f \end{bmatrix} = \mu \begin{bmatrix} -1 & 0 & l_c \\ 0 & 1 & -c_c \\ 0 & 0 & \frac{f}{\mu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (30) \quad \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ -f \end{bmatrix} = \mu \begin{bmatrix} 0 & 1 & -c_c \\ -1 & 0 & l_c \\ 0 & 0 & -\frac{f}{\mu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Frequentemente os manuais trazem o valor da distância focal  $f_{35}$  equivalente ao sensor de 35mm. Mas pelo *crop factor* (crf), parâmetro que exprime o quanto o sensor é menor que o padrão de 35mm, é possível obter a distância focal, conforme Equações 26 e 27, CIPA (2005).

### 2.4 Formulação Matemática para Correção da Distorção Projetiva

A correção da distorção projetiva consiste em reamostrar a imagem manipulando os pixels para a situação de visada do nadir, usando os princípios das equações de colinearidade, as quais são obtidas da Equação 20 ou 21 dividindo-se a primeira e segunda linha pela terceira, resultando nas Equações 22 e 23 no caso em que se utiliza o sistema aeronáutico. A relação inversa é obtida da transposta da matriz  $A^T = A^{-1}$ , resultando nas equações 24 e 25.

$$x_a = f \frac{a_{11}(E - E_c) + a_{12}(N - N_c) + a_{13}(U - U_c)}{a_{31}(E - E_c) + a_{32}(N - N_c) + a_{33}(U - U_c)} \quad (22) \quad y_a = f \frac{a_{21}(E - E_c) + a_{22}(N - N_c) + a_{23}(U - U_c)}{a_{31}(E - E_c) + a_{32}(N - N_c) + a_{33}(U - U_c)} \quad (23)$$

$$E - E_c = (U - U_c) \frac{a_{11} \cdot x + a_{21} \cdot y + a_{31} \cdot f}{a_{13} \cdot x + a_{23} \cdot y + a_{33} \cdot f} \quad (24) \quad N - N_0 = (U - U_c) \frac{a_{12} \cdot x + a_{22} \cdot y + a_{32} \cdot f}{a_{13} \cdot x + a_{23} \cdot y + a_{33} \cdot f} \quad (25)$$

Para o caso particular de visada do nadir ( $roll=0$  e  $pitch=0$ ) e alinhadas com o norte verdadeiro ( $proa=0$ ), os elementos de A que ficam não-nulos são  $a_{12}^0 = 1$ ,  $a_{21}^0 = 1$  e  $a_{33}^0 = -1$ . Neste caso, a equação de colinearidade inversa fica representada por 26 e 27, onde  $x_{a0}$  e  $y_{a0}$  são as coordenadas da imagem sem distorção projetiva, obtidas igualando-se essas equações com 24 e 25, pois referem-se às mesmas coordenadas ENU no terreno, resultando em 28 e 29.

$$E - E_c = (U - U_c) \frac{y_{a0}}{-f} \quad (26) \quad N - N_0 = (U - U_c) \frac{x_{a0}}{-f} \quad (27)$$

$$x_{a0} = -f \cdot \frac{a_{12} \cdot x_a + a_{22} \cdot y_a + a_{32} \cdot f}{a_{13} \cdot x_a + a_{23} \cdot y_a + a_{33} \cdot f} \quad (28) \quad y_{a0} = -f \cdot \frac{a_{11} \cdot x_a + a_{21} \cdot y_a + a_{31} \cdot f}{a_{13} \cdot x_a + a_{23} \cdot y_a + a_{33} \cdot f} \quad (29)$$

### 3. Resultados e Discussão

Foram utilizadas duas imagens obtidas com VANT em condição *off-nadir* para aplicação das técnicas de correção. Os ângulos de atitude em cada sistema estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Ângulos do sistema aeronáutico com os correspondentes do sistema fotogramétrico.

	<i>roll</i>	<i>pitch</i>	<i>"yaw"</i> (graus)	<i>omega</i>	<i>phi</i>	<i>kappa</i>
IMG_4596.JPG	-11,98	13,59	49,23	-0,43	-18,04	-50,73
IMG_4742.JPG	-18,01	10,02	211,71	-6,14	19,63	168,00

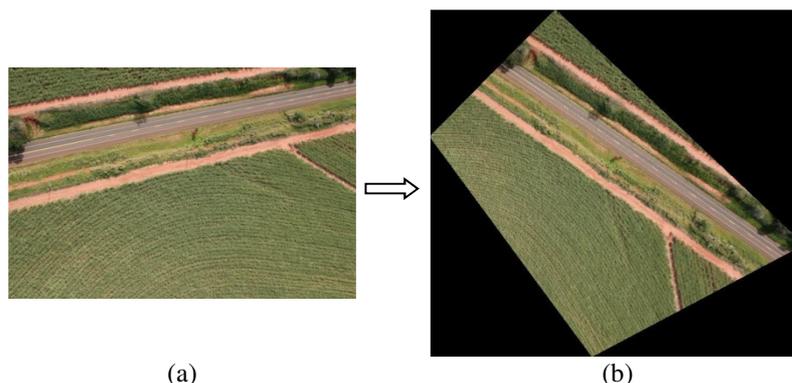


Figura 8. (a) Imagem IMG\_4596 original e (b) após correção da distorção projetiva.



Figura 9. (a) Imagem IMG\_4742 original e (b) após correção da distorção projetiva.

As Figuras 8 e 9 mostram que a geometria assumida pelas imagens corrigidas está coerente com os ângulos de rotação mostrados na Tabela 1. Por exemplo, na imagem IMG\_4596 original, a estrada tem menor largura na região à direita, devido ao ângulo de rolamento negativo, correspondente à inclinação do VANT à esquerda, que reduz os objetos na porção direita da imagem. Já na corrigida, a estrada mostra-se com largura constante. Além da correção de perspectiva, ocorreu também rotação da imagem pelo ângulo de 'yaw', alinhando-a ao norte verdadeiro.

#### 4. Conclusões

As técnicas desenvolvidas neste artigo para fins de correção de distorção projetiva pelo método das equações de colinearidade foram aplicadas em imagens adquiridas com VANT em condições *off-nadir* e mostraram-se adequadas.

Os conceitos e definições apresentados permitiram entender a forma de obtenção dos parâmetros geométricos da câmera. Também, foi esclarecida a diferença entre os ângulos de rotação dos sistemas aeronáutico e fotogramétrico, contribuindo para eliminar a confusão que pode ocorrer quando são compartilhados dados de VANT com os fotogramétricos.

**Agradecimentos:** à empresa Xrobots, fabricante do VANT Echar, pelo fornecimento das imagens e dos dados de voo para análise neste trabalho.

#### Referências Bibliográficas

- CIPA. **Guideline for noting digital camera specifications in catalogs**, DCG-001. Camera & Image Products Association – CIPA, Standardization Committee, 2005.
- Etkin, B.; Reid, L. D. **Dynamics of flight – stability and control**, 3rd Ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- Farrel, J.; Barth, M. **The global positioning system & inertial navigation**. New York: McGraw-Hill, 1998.
- Lima, S. A.; Brito, J. L. N. S. Estratégias para retificação de imagens digitais. Em: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis, 2006.
- Mikhail, E. M.; Bethel, J. S.; McGlone, J. C. **Introduction to modern photogrammetry**, Hoboken: Wiley, 2001.
- Shiguemori, E. H.; Martins, M. P.; Medeiros, F. L. L.; Domiciano, A. P.; Monteiro, M. V. T. **Módulo de visão computacional do projeto PITER: aplicações à navegação aérea autônoma por imagens**, São José dos Campos, Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA, 2008.
- Wolf, P. R. **Elements of Photogrammetry**. Singapore: Mc Graw-Hill, 1985.