

# PARÂMETROS DE DISTORÇÃO CAUSADA PELA ESCALA E NÃO-ORTOGONALIDADE ENTRE EIXOS NUMA CÂMARA DIGITAL: ESTUDO DE CASO

Francisco Rogério Ribeiro da Silva<sup>1</sup>  
Jorge Antonio Silva Centeno<sup>2</sup>  
Edson Aparecido Mitishita<sup>3</sup>

- 1 Centro de Hidrografia da Marinha – [frrs67@terra.com.br](mailto:frrs67@terra.com.br)
- 2 Universidade Federal do Paraná – [centeno@geoc.ufpr.br](mailto:centeno@geoc.ufpr.br)
- 3 Universidade Federal do Paraná – [mitishit@geoc.ufpr.br](mailto:mitishit@geoc.ufpr.br)

## RESUMO

O uso de imagens digitais em aplicações fotogramétricas tem crescido muito, em especial a partir de meados da década de 80, quando começaram a surgir as primeiras câmaras de vídeo baseadas em tecnologia de estado sólido, além da popularização dos computadores, com preços menores e pequenas dimensões.

Para utilizar uma câmara digital de vídeo não-métrica, ela deve primeiro ser calibrada. A calibração é um procedimento que visa a determinar os parâmetros que modelam os efeitos dos erros sistemáticos causados pela distorção radial simétrica e também pela distorção descentrada. Pode-se dizer que a calibração é um caso especial da aerotriangulação, já que o objetivo principal não é determinar coordenadas de pontos fotoidentificáveis, mas sim calcular parâmetros que permitam compensar e até mesmo eliminar os erros sistemáticos, possibilitando a restauração das condições de colinearidade.

Em fevereiro de 2002 conduziu-se um experimento de calibração de uma câmara de vídeo comum, para que se pudesse usar a mesma para fins videogramétricos. O método usado para a calibração foi o das Câmaras Convergentes, empregado principalmente para o uso de câmaras terrestres. Após o ajustamento ser realizado com todos os parâmetros, verificou-se que alguns parâmetros apresentaram-se como não-significativos, ou seja, seus desvios-padrão foram maiores que os valores ajustados. Os seguintes parâmetros foram não-significativos:  $K_1$ ;  $K_2$ ;  $K_3$ ; e  $B$ . Mais dois ajustamentos foram realizados, retirando-se parâmetros da distorção radial que seriam mais significativos, sem sucesso. Enfim, um quarto ajustamento foi realizado, desta vez sem os parâmetros  $K_3$  e  $B$ , resultando em que todos os parâmetros de calibração se tornassem significativos.

Este trabalho tem por objetivo analisar um caso de parametrização de distorções de uma câmara de vídeo, em especial os erros de escala e não-ortogonalidade dos eixos, usando imagens capturadas para um computador pessoal por um dispositivo de captura.

**Palavras-chave:** Ciências Geodésicas; Calibração; Erros Sistemáticos; Videogrametria.

### ABSTRACT

The usage of digital imagery in photogrammetric applications has grown increasingly, specially from the middle 80's, when the first solid state-based video cameras came out, as well as the popularization of computers, with smaller prices and dimensions. Using a non-metric digital video camera implies that it must be calibrated. Calibration is a procedure that aims to determine parameters to model the effects of systematic errors caused by radial symmetric distortion, as well as the discentered distortion. One might say that calibration is a special aerotriangulation case, for the main purpose is not to figure up photo-identifiable points' coordinates, but to calculate parameters to compensate and even eliminate systematic errors, thus restauring colinearity conditions.

In February 2002 a calibration experiment was conducted using a common digital video camera, so that it could be used for photogrammetric purposes. Calibration method used was Converging Cameras, mostly employed for terrestrial cameras. After a bundle adjustment with all parameters, some of them were non-significant, which means their standard deviations were greater than their adjusted values. The following parameters were non-significant:  $K_1$ ;  $K_2$ ;  $K_3$ ; and  $B$ . Two more adjustments were taken, withdrawing radial distortion parameters that would be more significant, but no success. Finally, a fourth adjustment was taken, this time without parameters  $K_3$  and  $B$ , resulting that all remaining parameters became significant.

This work aims to analyse a case of digital video camera distortions modelling, especially scale and non-orthogonality axis errors, using images obtained by that equipment, but captured into a personal computer by an image capture device, which alters pixel's dimensions and spatial resolution.

**Keywords:** Geodetic Science; Calibration; Systematic Errors, Videography.

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de imagens digitais em aplicações fotogramétricas tem crescido muito, em especial a partir de meados da década de 80, quando começaram a surgir as primeiras câmaras de vídeo baseadas em tecnologia de estado sólido, além da popularização dos computadores, com preços menores e pequenas dimensões. O avanço da tecnologia permite capturar imagens de vídeo diretamente para o microcomputador, através de dispositivos de captura, que, por sua vez, apresenta crescente capacidade de processamento de informações, com igual rapidez. Imagens geradas por sensores comuns, não-métricos, como câmaras de vídeo digitais populares, têm se tornado cada vez mais aceitas, principalmente pelo baixo custo do sensor. Infelizmente, a resolução geométrica das câmaras de vídeo comum ainda não torna dispensável uma câmara métrica, mas alguns trabalhos apresentam precisões consideráveis, indicando que talvez dentro de uma década a câmara de vídeo comum possa se tornar um sensor competitivo. Este trabalho tem por objetivo analisar um caso de parametrização de distorções de uma câmara de vídeo, em especial os erros de escala e não-ortogonalidade dos eixos, usando imagens obtidas por aquele equipamento, mas capturadas para um computador pessoal por um dispositivo de captura, que altera as dimensões dos pixels e a resolução geométrica.

### 1.1. BREVÍSSIMA REVISÃO

MONIWA (1977) demonstrou a necessidade de uso de parâmetros para modelar erros de escala e não-ortogonalidade entre eixos, advindos das diferenças de tamanhos entre pixels de uma mesma matriz de sensores (CCD – Charged-Coupled Device – Dispositivo Acoplado de Carga), bem como da falta de ortogonalidade entre os lados desta. Os parâmetros são modelados conforme as equações (01), vistas a seguir:

$$\begin{aligned}\delta_x &= A \cdot (x_f - x_0) \\ \delta_y &= B \cdot (x_f - x_0)\end{aligned}\tag{01}$$

onde

- $\delta_x$  é a distorção em fotocoordenadas, para o eixo x;
- $\delta_y$  é a distorção em fotocoordenadas, para o eixo y;
- $A$  é o parâmetro de distorção para o eixo x;
- $B$  é o parâmetro de distorção para o eixo y; e
- $(x_f - x_0)$  representa a coordenada fotogramétrica xP de um ponto qualquer.

O leitor deve ter notado a repetição do fator  $(x_f - x_0)$ , em ambas as fórmulas, ou seja, tanto para as fotocoordenadas em  $x$ , quanto para as fotocoordenadas em  $y$ . Tal se dá pelo fato de um dos eixos ser tomado como referência para a ortogonalidade, mas as diferenças de tamanho de pixels, em especial de equipamentos cujos CCD tenham pixels de tamanho retangular, afetam ambas as fotocoordenadas.

Entretanto, um dispositivo de captura de imagem que converta os sinais de uma câmara de vídeo digital — a fim de permitir seu processamento digital por um microcomputador pessoal —, permitirá ao seu usuário escolher entre alguns formatos que mantêm uma proporção de 4:3. Isso significa que o pixel, anteriormente de dimensões retangulares, passa a ter lados iguais, tornando-se um quadrado. Alguns dispositivos oferecem ainda dimensões que não mantêm a proporção acima descrita, como por exemplo um formato 704 x 480, mas ainda assim transformam os pixels de retangulares para quadrados. Neste estudo foi utilizado o formato de 640x480 pixels.

## 2. EXPERIMENTO EFETUADO

Em fevereiro de 2002 conduziu-se um experimento de calibração de uma câmara de vídeo comum, modelo JVC GR-DVF10U, visto na figura 1, para que se pudesse usar a mesma para fins videogramétricos.

FIGURA 1 – CÂMARA DE VÍDEO JVC GR-DVF10U



O método utilizado para a Calibração foi o chamado “Câmaras Convergentes”, também chamado de *SELF-CALIBRATION*, ou autocalibração (OLIVAS, 1980). Para mais métodos e modelos de calibração, ver JAIN, KASTURI e SCHUNCK (1995), ANDRADE e OLIVAS (1981), e GALO (1993).

Foram tiradas onze fotos de um campo de calibração situado na parede externa do bloco VI do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), situado em Curitiba-PR, visto na figura 2.

FIGURA 2 – ESQUEMA DE ALVOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO



As onze fotos foram obtidas da seguinte maneira: duas sem rotação (posição normal de uso da câmara), uma perpendicular à parede, e outra com uma inclinação de  $45^\circ$ ; três com a câmara rotacionada de  $90^\circ$  no sentido horário, uma perpendicular e duas com inclinações de  $45^\circ$ , positiva e negativa; três com a câmara rotacionada de  $180^\circ$ , uma perpendicular e duas com inclinações de  $45^\circ$ , positiva e negativa; e três com a câmara rotacionada de  $90^\circ$  no sentido anti-horário, uma perpendicular e duas com inclinações de  $45^\circ$ , positiva e negativa. Com isso, procurou-se obter dez parâmetros de calibração da câmara, a saber:

- $(x_0, y_0)$ , coordenadas do centro perspectivo, no referencial fiducial;
- $c$ , valor da distância focal;
- $K_1, K_2$ , e  $K_3$ , coeficientes da distorção radial simétrica;
- $P_1$  e  $P_2$ , coeficientes da distorção descentrada;
- $A$  e  $B$ , coeficientes dos erros de escala e não-ortogonalidade entre os eixos.

Cada foto possuía doze pontos, cujas coordenadas foram determinadas através de interseção à vante. A matriz variância-covariância de determinação das coordenadas foi obtida através de propagação de covariâncias, tendo-se o erro de determinação da distância (base), bem como os erros de medição das direções, através do uso de teodolitos Leica T-105.

Sendo assim, o vetor de parâmetros ajustados é dado conforme se pode ver na equação 02.

$$X_a^T = \begin{bmatrix} \kappa_1 & \varphi_1 & \omega_1 & X_{0_1} & Y_{0_1} & Z_{0_1} & \cdots & \kappa_n & \varphi_n & \omega_n & X_{0_n} & Y_{0_n} & Z_{0_n} & \cdots \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & \cdots & X_m & Y_m & Z_m & x_0 & y_0 & c & K_1 & K_2 & K_3 & P_1 & P_2 & A & B \end{bmatrix} \quad (02)$$

para  $n$  fotos e  $m$  pontos do espaço-objeto (GALO; HASEGAWA; TOMMASELLI, 2000). O vetor  $X_a$  vem das seguintes operações matriciais, descritas pelo conjunto de equações 03:

$$\begin{aligned} L &= L_0 - L_b \\ N &= A^T \cdot P \cdot A \\ U &= A^T \cdot P \cdot L \\ X &= -N^{-1} \cdot U \\ V &= A \cdot X + L \\ X_a &= X_0 + X \end{aligned} \quad (03)$$

onde:

- $L_0$  é o vetor de valores das observações calculados com os parâmetros aproximados;
- $L_b$  é o vetor de valores observados;
- $P$  é a matriz dos pesos;
- $X_0$  é o vetor de valores dos parâmetros aproximados ou ajustados na  $i$ -ésima iteração;
- $X$  é o vetor de correções ao vetor  $X_0$ ;
- $V$  é o vetor de resíduos das observações;
- $X_a$  é o vetor de parâmetros ajustados; e
- $A$  é a matriz de derivadas parciais da função utilizada como modelo matemático, definida pelos valores em  $X_0$ , conforme se verifica na equação 04.

$$\left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{X_0} \quad (04)$$

Com efeito, ao se usarem as onze fotos, foram obtidas 131 leituras, ou seja, 264 coordenadas, contra 112 parâmetros. Como a calibração é um caso particular da

aerotriangulação, mesmo com graus de liberdade suficientes para permitir uma análise estatística de resultados com um ajustamento, a matriz  $N$  é singular. Para conseguir torná-la inversível e resolver o ajustamento, é necessário estabelecer injunções (neste caso, de posição), a fim de fixar um plano referencial. Portanto, sabendo-se as precisões de determinação de cada ponto, foram aplicadas injunções a todos eles, somente sendo variáveis os parâmetros de orientação de cada foto e os parâmetros de calibração. Para maiores detalhes sobre o método paramétrico com injunções, ver ANDRADE e OLIVAS (1981).

GALO et al (2000) apresentaram um estudo sobre o comportamento do ponto principal, e concluíram que suas coordenadas apresentam variação, de acordo com o posicionamento da câmara. Para este estudo, o ponto principal foi considerado como não-variável.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

À tarefa de determinar os parâmetros da câmara juntou-se mais uma: a de determinar as coordenadas dos pontos do campo de calibração. Tal foi feito empregando-se o método conhecido por interseção avante. Com um pequeno programa desenvolvido em MATLAB foi possível calcular com boa acurácia as coordenadas dos doze pontos utilizados como referência, permitindo ao usuário usar um deles como origem — mesmo a origem tem variâncias propagadas. O programa calcula também, por propagação de covariâncias, os desvios-padrão de cada coordenada ( $X, Y, Z$ ) obtida. A tabela 1 mostra os resultados calculados.

TABELA 1 – COORDENADAS DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO E PRECISÕES

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)	$\sigma_x$ (m)	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
1	-1,0035	3,1522	0,0670	4,826E-04	1,385E-03	7,000E-03
2	-0,0029	3,1517	-0,0026	5,812E-04	1,384E-03	7,032E-03
3	0,9921	3,1507	-0,0662	9,956E-04	1,384E-03	7,063E-03
4	1,9904	3,1506	-0,1337	1,482E-03	1,386E-03	7,096E-03
5	-0,9891	1,5787	0,0661	4,801E-04	6,064E-04	7,000E-03
6	0,0074	1,5798	-0,0011	5,845E-04	6,077E-04	7,031E-03
7	1,0070	1,5820	-0,0705	1,003E-03	6,106E-04	7,065E-03
8	1,9876	1,5815	-0,1374	1,481E-03	6,132E-04	7,098E-03
9	-0,9931	-0,0030	0,0663	4,808E-04	4,555E-04	7,000E-03
10	0	0	0	5,821E-04	4,556E-04	7,031E-03
11	0,9973	-0,0047	-0,0677	9,980E-04	4,600E-04	7,063E-03
12	1,9946	-0,0017	-0,1364	1,485E-03	4,627E-04	7,097E-03

Após o ajustamento ser realizado com todos os parâmetros, verificou-se que alguns parâmetros apresentaram-se como não-significativos, ou seja, seus desvios-padrão foram maiores que os valores ajustados. Num primeiro ajustamento, os seguintes parâmetros foram não significativos:  $K_1$ ;  $K_2$ ;  $K_3$ ; e  $B$ . Tentou-se, então, retirar os parâmetros menos significativos, começando pelo coeficiente  $K_3$ , que modela as frequências mais altas da distorção radial simétrica. Um segundo ajustamento foi realizado, sem  $K_3$ , e foi observado que o parâmetro  $B$  continuou como não-significativo. Num terceiro ajustamento, também o coeficiente  $K_2$  foi retirado, uma vez que o parâmetro que mais influi na correção da distorção radial simétrica é  $K_1$ . Ainda assim, o parâmetro  $B$  continuou não-significativo. Enfim, um quarto ajustamento foi realizado, desta vez sem os parâmetros  $K_3$  e  $B$ , resultando em que todos os parâmetros de calibração se tornassem significativos.

Os parâmetros da câmara podem ser vistos na tabela 2.

TABELA 2 – PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DETERMINADOS

	Valor ajustado	Desvio-padrão
$x_0$	-0,24179mm	0,030426mm
$y_0$	0,083022mm	0,026785mm
$c$	6,8254mm	0,025885mm
$K_1$	$-1,2106 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-2}$	$6,3887 \cdot 10^{-4}$
$K_2$	$-1,2034 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^{-4}$	$9,1913 \cdot 10^{-5}$
$P_1$	$-5,1341 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^{-2}$	$1,6573 \cdot 10^{-4}$
$P_2$	$2,904 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^{-2}$	$1,6565 \cdot 10^{-4}$
$A$	$7,3281 \cdot 10^{-2}$	$5,4573 \cdot 10^{-4}$

FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA

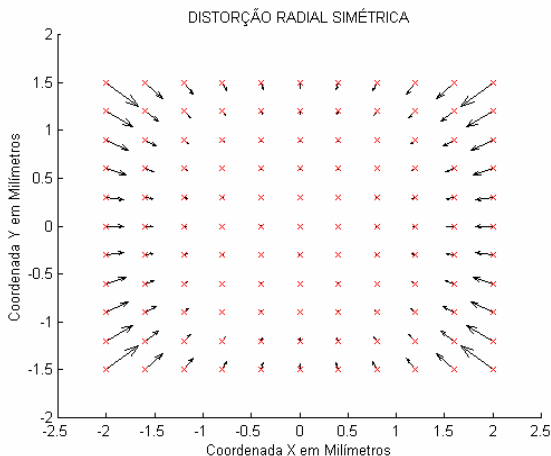




FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DA DISTORÇÃO DESCENTRADA

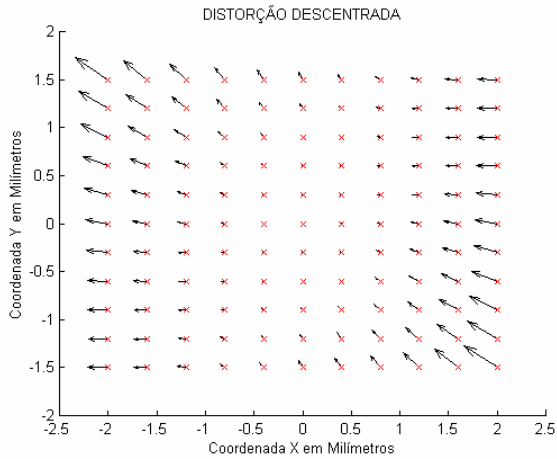
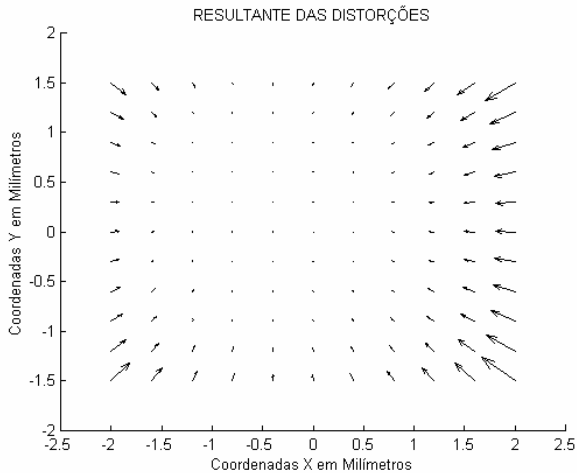


FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DA RESULTANTE DAS DISTORÇÕES



#### 4. CONCLUSÕES

Ao se calibrar uma câmara digital utilizando imagens que são capturadas por uma dispositivo que altera a forma dos pixels, na verdade calibrar-se-á o dispositivo de captura, para as distorções radial simétrica, descentrada e para os erros de escala

e não-ortogonalidade dos eixos. As coordenadas utilizadas como fiduciais são colhidas das imagens capturadas, e não diretamente da câmara de vídeo, ou seja, já se encontram com outro formato e resolução geométrica.

Como o dispositivo de captura redimensiona e rearranja os pixels numa matriz digital que não apresenta erros de ortogonalidade entre seus eixos, por não ser uma entidade virtual e sim digital, conclui-se que — para este caso — aquele dispositivo minimizou ou mesmo eliminou o erro de ortogonalidade entre os eixos. Permanece então a questão da manutenção do parâmetro  $A$ . Mesmo tendo sido eliminado o parâmetro  $B$ , o parâmetro  $A$  continuava a ser significativo. A resposta está no fato de que o dispositivo de captura redimensionou o tamanho dos pixels, tornando-os quadrados. Além disso, a resolução da câmara utilizada neste experimento é de 720 x 540 pixels (coluna x linha), entretanto, o dispositivo de captura de imagem a reduziu para 640 x 480 pixels, mantendo uma proporção de 4:3. Conclui-se, então, que o parâmetro  $A$  se mantém significativo porque o CCD do equipamento apresenta pixels retangulares, com maior dimensão no eixo  $x$ , tomado como referência para o cálculo dos parâmetros  $A$  e  $B$ . Ao ser transformado o pixel retangular em quadrado, uma distorção na imagem é introduzida pelo dispositivo de captura, que tenta compensá-la através da mudança de resolução. Como o pixel tem menor dimensão no eixo  $y$ , este não sofre tanto os efeitos da mudança de dimensões.

## 5. REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. B.; OLIVAS, M. A. A. Calibração de câmaras aerofotogramétricas. **Boletim da Universidade Federal do Paraná**, Curitiba, n° 26, 1981.

GALO, M. **Calibração e aplicação de câmaras digitais**. Curitiba, 1993. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; TOMMASELLI, A. M. G. Avaliação geométrica de câmaras de vídeo para uso em fotogrametria digital. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 2000, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B.G. **Machine Vision**. MIT Press and McGraw-Hill, Inc. 1995.

MONIWA, H. **Analytical photogrammetric system with self-calibration and its applications**. Ph. D. Thesis, Department of Surveying Engineering, UNB, 1977.

OLIVAS, M. A. A. **Calibração de câmaras fotogramétricas**. Curitiba, 1980. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

## 6. BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBBE, 1998.

BROWN, D. C. **An advanced reduction and calibration for photogrammetric cameras**. EUA: Instrument Corp of Florida, 1964.

BROWN, D. C. **Decentering distortion and the definitive calibration of metric cameras**. The American Society of Photogrammetry Convention, mar., 1965.

BROWN, D. C. Decentering distortion of lenses. **Photogrammetric Engineering**. v. 32, n. 3, 1966.

ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S. A. **Aerotriangulação**. Disponível em <[http://www.esteio.com.br/servicos/so\\_aerotriang.htm](http://www.esteio.com.br/servicos/so_aerotriang.htm)> Acesso em 14 out. 2002.

JVC Company of America. **Two high performance dv camcorders added to cybercam line**. Disponível em <<http://www.jvc.com/company/press.jsp?pressType=2&item=97>> Acesso em 17 out. 2002.

SPIRO, P. **Review of JVC miniDV GR-DV3 and GR-DVM5 digital camcorder**. Disponível em < <http://webhome.idirect.com/~spirop/dv3rev.htm>> Acesso em: 17 out. 2002.

## 7. AGRADECIMENTOS

À Marinha do Brasil, por todo o apoio logístico, sem o qual jamais teria sido possível realizar e concluir o mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG).

Aos meus mestres, amigos e colegas do mestrado e doutorado do CPGCG, sem a ajuda e apoio dos quais seria impossível vencer uma das etapas mais difíceis e, ainda assim, mais gratificantes da minha vida.

À minha família, pela compreensão e força nos (raros) momentos de desânimo.