

# MODERNAS TECNOLOGIAS DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS EM FOTOGRAMETRIA

Antonio M. G. TOMMASELLI  
Júlio K. HASEGAWA  
Maurício GALO

Universidade Estadual Paulista - Unesp  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Cartografia  
Rua Roberto Simonsen, 305, C.P. 957, 19.060-900 Presidente Prudente, S.P.  
{tomasei, hasegawa, galo}@prudente.unesp.br

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma visão geral de alguns sensores digitais utilizados em mapeamento, comparando sua eficiência com o processo convencional de aquisição de dados em Fotogrametria. Será dada ênfase às câmaras de vídeo, sensores de *frame* e sensores tri-lineares digitais aerotransportados, sendo apresentadas e discutidas as vantagens, limitações e tendências atuais de aplicação destes sistemas.

## ABSTRACT

The aim of this work is to present an overview of recent digital sensors used in mapping activities and to compare its performance to the conventional photogrammetric process of data acquisition. Emphasis is given to video cameras, frame sensors and airborne digital three-linear sensors, showing the advantages, limitations and perspectives of applications of these systems.

## INTRODUÇÃO

Embora disponíveis há mais de duas décadas para imageamento em plataformas orbitais, os sensores digitais têm sido pouco empregados para mapeamento em escalas grandes pelo processo fotogramétrico. Isto se deve à alta resolução e eficiência das câmaras fotogramétricas convencionais e aos requisitos de exatidão exigidos para o mapeamento em escalas grandes.

No mercado de câmaras domésticas, a tecnologia digital está sendo disseminada, embora os custos das câmaras e da reprodução em papel ainda sejam superiores aos processos convencionais baseados em filmes. Para aplicações em

mapeamento, entretanto, há uma demanda por sensores de alta resolução e com grande área de cobertura, o que significa dispositivos CCDs com grande número de elementos sensores.

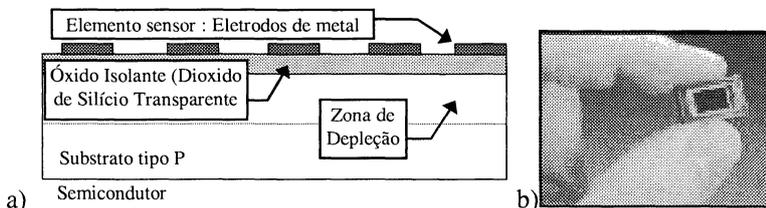
Estas câmaras digitais foram introduzidas recentemente no mercado, possuindo resolução e cobertura compatíveis com as obtidas por uma câmara fotogramétrica convencional. Entretanto, os custos do aerolevanteamento com câmaras digitais desta natureza, ainda é superior aos de um aerolevanteamento convencional. Como a tecnologia digital avança muito rapidamente, espera-se para breve a remoção destes problemas.

Por outro lado, o advento dos novos satélites imageadores, oferecendo um elemento de resolução da ordem de 1m, não deverá afetar os processos de produção de cartas em escalas grandes, que continuarão a ser feitas por aerofotogrametria, por várias razões:

- a configuração geométrica (relação base/altura) dos estereopares (quando disponíveis) é inferior àquela obtida por processos fotogramétricos de baixa altitude;
- não é possível alterar a altitude e a frequência temporal dos sensores orbitais, ao passo que as plataformas aéreas podem coletar imagens a baixa altitude, permitindo o mapeamento em escalas grandes com a frequência desejada;
- de acordo com Dowman (1996), há uma relação entre o número de pares de linhas visíveis na imagem e de pixels, da ordem de 1:2 a 1:3, ou seja, são necessários de 2 a 3 pixels para identificar um par de linhas. Portanto, para um tamanho de pixel de 1m seriam identificáveis objetos isolados da ordem de 3 metros, o que restringe o uso destas imagens para aplicações em escalas grandes;
- para aplicações na qual o fator tempo seja um fator limitante, a utilização de produtos de natureza orbital fica prejudicada devido ao ciclo de aquisição, processamento e disponibilização para o usuário.

## O QUE É UM SENSOR CCD?

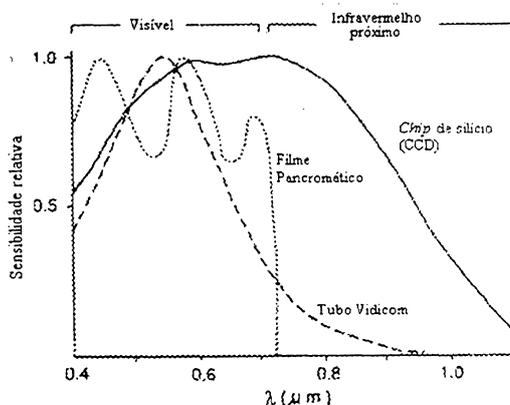
O coração da tecnologia de imageamento digital é o chip CCD (**Charge Coupled Device**). Os dispositivos de acoplamento de carga (CCD) são circuitos integrados de silício usados como transdutores de imagem. Um dispositivo transdutor é aquele capaz de transformar uma forma de energia em outra, no caso energia luminosa em energia elétrica. Os sensores CCDs são fabricados sob o formato de um conjunto linear ou bidimensional (matricial) de células (figura 1).



**Figura 1:** O sensor CCD (*Charge Coupled Device*): (a) Corte esquemático de um sensor CCD; (b) Exemplo de um CCD de uma câmara digital Kodak DC40 (fonte: [www.kodak.com](http://www.kodak.com))

Na figura 1(a) mostra-se um corte esquemático das partes de um chip CCD e na figura 1(b) um exemplo de um modelo usado em uma câmara de uso doméstico.

O desenvolvimento tecnológico dos sensores para captura de imagens, desta natureza, tem provocado melhorias significativas que permitem o aumento da resolução radiométrica, comparada à tecnologia analógica e aos filmes pancromáticos, pois cobrem um campo mais amplo do espectro eletromagnético, como pode ser visto na figura 2 (WRIGHT, 1993).



**Figura 2:** Curvas de sensibilidade espectral para diferentes tipos de sensores. (Fonte: WRIGHT, 1993)

Segundo SHORTIS & BEYER (1996) os sensores de silício fornecem uma resposta melhor à detecção de radiação no intervalo espectral de 400 - 1100 nm, como pode ser visto no gráfico mostrado na figura 2.

## AQUISIÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

Um sistema básico de coleta (ou aquisição) de imagens contém um sistema de lentes, um material foto-sensível e um sistema de gravação final da imagem. No caso de câmaras convencionais o material fotosensível é um filme químico. Quando

se fala em “fotografia digital” ou imagem digital, o detector é um sensor de estado sólido, e o mais comum é o CCD.

No CCD matricial os pixels são criados por milhares de fotocélulas microscópicas, que são fotosensíveis. Como as câmaras normalmente têm somente um CCD, a captura de imagens coloridas é feita utilizando-se uma matriz de filtros RGB, colocada na frente do CCD. Posteriormente as cores são interpoladas computacionalmente. Alguns poucos modelos de câmaras de vídeo e/ou digitais possuem 3 CCDs, um para cada cor primária.

## DIGITALIZAÇÃO EM “SCANNERS”

O *scanner* é um dispositivo ótico-mecânico-eletrônico que faz uma varredura na imagem fotográfica produzindo uma imagem digital, que pode ser armazenada e processada em computador. Neste sentido, pode-se dizer que o *scanner* produz uma **cópia digital** do negativo ou da foto. Esta imagem digital pode ser manipulada de várias maneiras, incluindo a ampliação ou redução em tela e a impressão em impressoras a laser, térmicas, jato de cera, ou jato de tinta de alta resolução.

Os *scanners* são um tipo de dispositivo de captura de imagens digitais que usam três linhas de sensores CCD, cada qual com um filtro colorido, numa das cores primárias (RGB). Cada um dos sensores lineares, que contem milhares de fotocélulas, varre a imagem analógica (fotografia) para capturar a imagem, uma linha por vez.

Existem outros tipos de “*scanners*” como os de cilindro (ou tambor), os de mesa (*flatbed*) e os manuais. Os *scanners* de cilindro são de última geração e têm sido muito usados pela indústria gráfica.

O processo de conversão da luz refletida em fotografias analógicas para imagens eletrônicas é chamado conversão fotoelétrica. Este processo pode ser resumido em alguns passos:

- em cada pixel amostrado, a fotocélula do CCD “lê” a luz refletida (ou transmitida) pela fotografia e gera um sinal elétrico proporcional à quantidade de luz; quanto maior a intensidade de luz, maior será a voltagem gerada;
- esta voltagem é armazenada em um capacitor e depois transferida para um registrador;
- a voltagem é redirecionada para um conversor A/D analógico-digital.

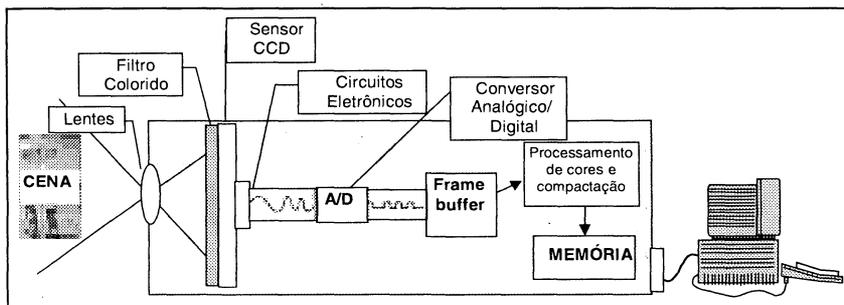
No processo de quantização são atribuídos valores numéricos aos pixels, o que determina a “profundidade” do pixel. Quanto maior for o número de bits que o conversor A/D puder processar, mais valores de brilho poderão ser representados.

A diferença dos *scanners* fotogramétricos em relação aos *scanners* convencionais está na qualidade geométrica de posicionamento do CCD, o que depende do tipo de servo-motor utilizado e da confiabilidade dos componentes mecânicos. Em alguns modelos, há uma placa *reseau* sobre a área de digitalização, que permite aferir a qualidade da digitalização.

Um dos elementos fundamentais de um *scanner* é a sua resolução ótica, isto é, o tamanho do pixel obtido por meios óticos. É importante distinguir entre a resolução do *scanner*, que equívale ao tamanho do pixel e à resolução da imagem, que pode ser reamostrada por interpolação chegando a um pixel menor do que o obtido por meios óticos.

## CÂMARAS DIGITAIS

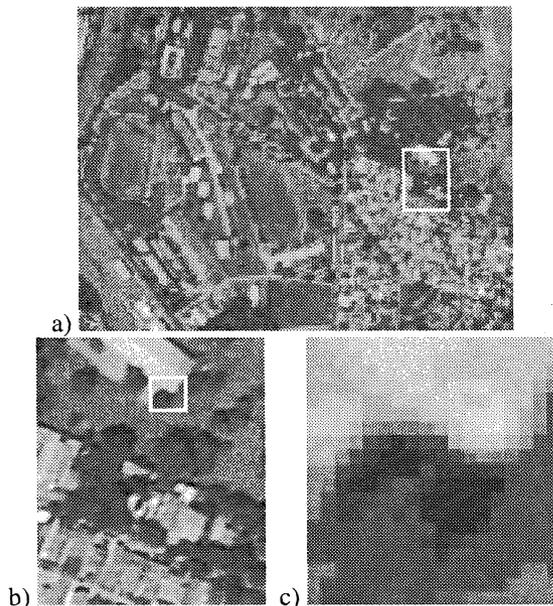
As câmaras digitais são dispositivos para a coleta e armazenamento de imagens digitais. De modo geral, uma câmara digital possui um sistema de lentes, um chip CCD, processadores e uma memória para o armazenamento das imagens. Trata-se de um pequeno computador, pois possui capacidade de processamento e de comunicação com outros computadores. A figura 3 apresenta um esquema das partes de uma câmara digital genérica. As partes individuais e as formas de interface com o usuário e com o computador variam de acordo com o fabricante e modelo.



**Figura 3:** Esquema de captura de imagens por uma câmara digital.

O conversor A/D transforma o sinal elétrico analógico gerado pelo CCD em um sinal digital, que é armazenado em uma memória temporária (*frame-buffer*). Esta imagem é, então, processada para a interpolação de cores e compactação, sendo armazenada em uma unidade de massa. Em alguns modelos esta unidade pode ser um cartão de memória *flashcard* ou mesmo um disco rígido *SCSI*. As imagens armazenadas podem ser transferidas para o computador por intermédio de uma conexão serial, *SCSI* ou outros tipos de interface.

A figura 4 mostra uma imagem aérea coletada com uma câmara digital de uso doméstico, a Kodak DC-210, que possui resolução de 1152x864 pixels. A figura 4(a) mostra a imagem original reamostrada e as figuras 4(b) e 4(c) porções ampliadas da mesma imagem, permitindo uma noção dos detalhes capturados.

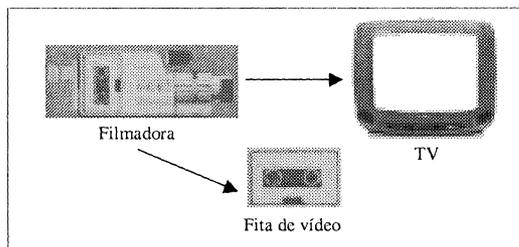


**Figura 4:** Exemplo de imagem aérea coletada com a câmara digital Kodak DC210: (a) Imagem original reamostrada; (b) e (c) detalhes da imagem.

### 3.3 FILMADORAS

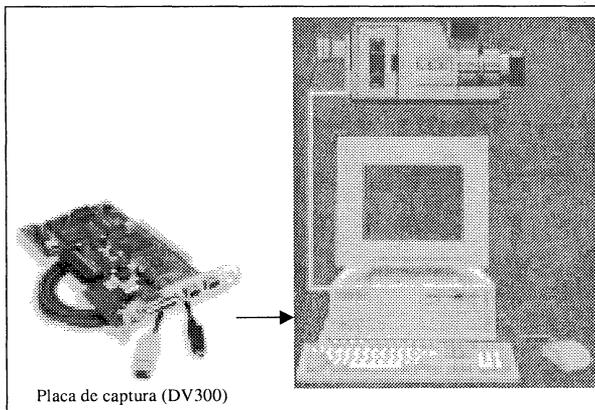
A tecnologia de aquisição de dados primários (imagens) para Fotogrametria tem se mostrado muito versátil, possibilitando o uso de diversos dispositivos para esta operação. Neste sentido, as filmadoras analógicas ou digitais têm sido utilizadas como dispositivo de aquisição de imagens com finalidades métricas, para algumas aplicações.

Na câmara fotográfica convencional a luz sensibiliza a emulsão fotográfica, cuja imagem será visível após o processo de revelação química, enquanto que as filmadoras gravam as imagens em fitas, a uma taxa de, aproximadamente, 30 quadros por segundo e permitem a visualização (*on-line*) num monitor de TV (figura 5).



**Figura 5:** Sistema de aquisição e visualização em tempo real de imagens.

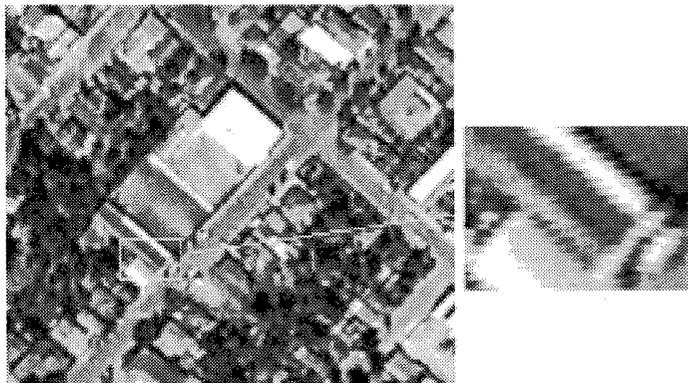
Nas filmadoras digitais, as imagens são capturadas a partir de um *chip* de silício, semelhante ao da câmara digital, e, a partir de circuitos internos que agem como placa de captura, elas são armazenadas em fitas no formato digital. Assim, estas imagens gravadas em fita magnética, podem ser transmitidas (figura 6) para o computador, via placa de captura (ou *FireWare* para o formato digital), operação esta que envolve a conversão do sinal de vídeo (analógico) para o formato digital. Existem no mercado vários tipos de placas de captura que executam as mais diversas operações, como a gravação em fita, a compressão das imagens e a gravação em CD ou discos rígidos, sendo que estas últimas são mais adequadas para Fotogrametria. Geralmente, as placas capturam as imagens no formato AVI (*Audio Video Interleave*) que é acessível aos editores de vídeos, possibilitando a captura de quadros isolados.



**Figura 6:** Sistema de captura da imagem pelo PC.

As filmadoras, bem como algumas câmaras digitais utilizam o sinal de vídeo padrão. Entre os padrões de vídeo pode-se considerar: NTSC, PAL, SECAM e RGB (GRUEN, 1987). Estes padrões estão associados ao modo de transmissão: entrelaçados (*interlaced*) e não entrelaçados (*non-interlaced*). No padrão entrelaçado a transmissão da imagem se dá de modo alternado entre as linhas, ou seja, as linhas pares são transmitidas num campo e posteriormente o campo das linhas ímpares. Isto provoca um serrilhamento nas bordas das feições na imagem (figura 7), se ocorrer movimento relativo entre câmara e alvo durante a aquisição.

Um outro problema de transmissão muito conhecido nas imagens digitais é o erro devido ao problema de sincronização do sinal do vídeo, conhecido como *Line Jitter*, que provoca um efeito aleatório (GALO, 1993 e LAURIN, 1993).



**Figura 7:** (Esq.) Imagem tomada com uma filmadora analógica. (Dir.) Ampliação da imagem mostrando o serrilhamento provocado pelo entrelaçamento.

### COMPARAÇÃO ENTRE CÂMARAS ANALÓGICAS E DIGITAIS

Neste tópico serão feitas algumas considerações sobre as câmaras métricas convencionais (analógicas métricas) e câmaras digitais, procurando mostrar suas vantagens e desvantagens, bem como apresentar algumas características geométricas e radiométricas.

A mais simples e primitiva câmara é a de *pinhole*, conhecida como câmara de orifício ou buraco de agulha, que é uma caixa hermeticamente fechada com um pequeno orifício. Este dispositivo, teoricamente, deixa passar os raios de luz provenientes dos pontos objeto, projetando a cena invertida no plano oposto ao do orifício, produzindo uma imagem sem aberrações e distorções. Esta característica é de fundamental importância na Fotogrametria, pois é a que representa com maior fidelidade as considerações da ótica geométrica, atendendo plenamente às equações utilizadas na Fotogrametria.

Entretanto, esta câmara deixa passar pouca luminosidade pelo pequeno orifício, tornando-a extremamente lenta, incapacitando-a para a maioria dos trabalhos fotogramétricos. Com a finalidade de eliminar este problema, usam-se lentes para aumentar a quantidade de luz que passa pelo orifício. Desta forma, as lentes utilizadas numa câmara fotográfica tem por finalidade reunir os raios de luz que vêm do objeto e focalizá-los em alguma posição do lado oposto à lente.

Contudo, as lentes provocam imperfeições na imagem, degradando a nitidez e produzindo aberrações (aberração esférica, astigmatismo e curvatura de campo, coma e aberração cromática). Uma destas aberrações, conhecida como aberração de Seidel, provoca o deslocamento dos pontos, e estes erros podem ser modelados por um procedimento de calibração dos parâmetros intrínsecos da câmara, muito comum em Visão Computacional e Fotogrametria. Estes parâmetros são determinados juntamente com os parâmetros extrínsecos de calibração, durante o processamento

computacional. Existem várias formulações matemáticas que modelam com maior ou menor aproximação as condições físicas que ocasionam os erros (TOMMASELLI & TOZZI, 1990; GALO, 1993; ANDRADE, 1998). A decisão para a correção ou não de cada erro, deverá ser tomada para cada caso, considerando a precisão requerida e a magnitude do erro sistemático.

#### 4.1 CÂMARAS ANALÓGICAS

Uma câmara métrica tem como características básicas um sistema de lentes estável, com alta qualidade geométrica, de forma a proporcionar imagens com pequenas aberrações e dispositivos obturadores para possibilitar as tomadas fotográficas em alta velocidade a fim de diminuir o arrastamento. Para o mapeamento, as câmaras devem ter os seus parâmetros de orientação interior (distância focal e deslocamento do ponto principal) conhecidos *a priori* ou por auto-calibração, a fim de possibilitar a reconstrução 3D dos objetos fotografados. Nas câmaras métricas a geometria do feixe de raios pode ser reconstruída a partir das marcas fiduciais, que são gravadas no filme no instante da exposição.

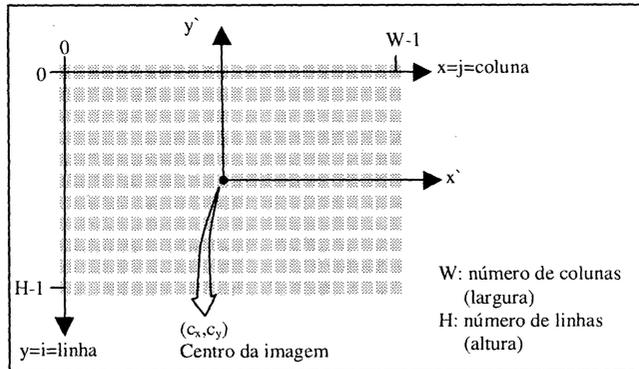
Neste tipo de câmara o produto primário gerado é o negativo fotográfico, que pode ser reproduzido em forma de fotografias ou diapositivos e, atualmente, em forma digital a partir do processo de digitalização por um "*scanner*" de precisão. As imagens aéreas digitalizadas por meios de "*scanner*", geralmente, ocupam grandes espaços de memória, podendo ter centenas de Megabytes. Desta forma, faz-se necessário aplicar técnicas de compressão de imagens, que podem ser, basicamente, realizadas por dois procedimentos: compressão sem perda (*Lossless*) e compressão com perda (*Lossy*) de informações (LUCCA, 1994)

O método mais popular e que possibilita altas taxas de compressão é o *JPEG* (*Joint Photographic Experts Group* - Grupo responsável pela definição desse padrão de compressão), cujo procedimento pode ser com ou sem perda de informações. Este processo de compressão é realizado aplicando-se a Transformação Discreta do Co-seno (TDC) em blocos de 8x8 pixels. Em função da taxa de compactação desejada o número de coeficientes é escolhido, ocorrendo uma maior ou menor perda de informação. Finalmente, processa-se a composição final das tabelas de códigos baseadas na frequência de valores repetidos pela codificação de *Huffman* (LUCCA 1994).

#### 4.2 GEOMETRIA DAS CÂMARAS DIGITAIS

Em função da disposição dos fotodetores em sensores digitais, pode-se considerar três grupos: varredura ótico-mecânica (*opto-mechanical scanner*), de arranjo linear (*linear array*) e de arranjo matricial. Este último modelo, é o mais comum e o que mais se assemelha às câmaras convencionais (analógicas), podendo assim utilizar os mesmos procedimentos e modelos matemáticos adotados na Fotogrametria Analítica (GALO, 1993).

Assim, a cada tomada fotográfica da câmara digital, gera-se uma imagem bidimensional, na qual cada elemento é associado a um tom de cinza, expresso genericamente por  $g(i, j)$ . Trabalhando-se no modo digital os valores da intensidade do pixel são discretizados em  $2^n$  tons de cinza. No caso de imagens com palavras de um byte (8-bits) podem ser representados 256 tons de cinza (ou 256 cores).



**Figura 8:** Matriz de pixels, com sistema de coordenadas de tela e fotográfico, este último definido a partir do centro da imagem.

Nas câmaras digitais, os sensores estão ordenados em forma matricial; assim o sistema de coordenadas de tela é solidário aos fotodetectores, possibilitando a realização da orientação interior da câmara, sem a necessidade das marcas fiduciais. A partir do sistema de coordenadas da tela pode-se, por uma transformação, obter as coordenadas de todos os pontos (pixels) no sistema  $(x', y')$ , equivalente ao sistema fiducial das câmaras métricas. Sabendo que as dimensões dos pixels nas direções  $x$  e  $y$  sejam respectivamente  $S_x$  e  $S_y$  a transformação  $(x, y) \Rightarrow (x', y')$  pode ser escrita por:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & -S_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - (W-1)/2 \\ y - (H-1)/2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 4.3 ANÁLISE DAS CÂMARAS

Dentre as vantagens dos sensores digitais pode-se citar: rápida análise e processamento dos dados capturados, já que nenhuma revelação fotográfica é necessária; uma grande variedade de resoluções; a coleta digital dos dados, permitindo a visualização "quase" que imediata das imagens e a possibilidade de automação de algumas fases do processo fotogramétrico de produção dos mapas. No caso de filmadoras digitais, além das citadas anteriormente, outras vantagens podem ser destacadas: a disponibilidade de imagens contínuas, a possibilidade de um revôo virtual (*playback*) para reconhecimento e a capacidade de gravação de sons permitindo-se comentários durante a aquisição de dados.

Por outro lado, as câmaras analógicas têm grande estabilidade geométrica, proporcionando a precisão requerida pelas atividades de mapeamento. A resolução espacial deste tipo de câmara é, atualmente, superior à digital. Além disso as câmaras analógicas podem proporcionar imagens de maior definição pois o dispositivo de compensação do arrastamento (FMC – *Forward Motion Compensation*) permite o uso de filmes lentos (granulação fina).

Atualmente, as câmaras digitais utilizadas em aplicações fotogramétricas ainda possuem pequena área útil de recobrimento, tornando seu rendimento inferior ao das câmaras convencionais. Este baixo rendimento implica em aumento no número de imagens e conseqüentemente, de pontos de apoio de campo e aerotriangulados, onerando o processo fotogramétrico de produção dos mapas digitais nas fases seguintes.

## 5 PERSPECTIVAS

Neste tópico são apresentados alguns sistemas que estão há algum tempo sendo pesquisados e que apresentam um grande potencial em aplicações cartográficas. Entre estes sistemas apresenta-se os Sistemas Digitais de Alta Resolução e o *Scanner* trilinear.

### 5.1 SISTEMAS DIGITAIS DE ALTA RESOLUÇÃO

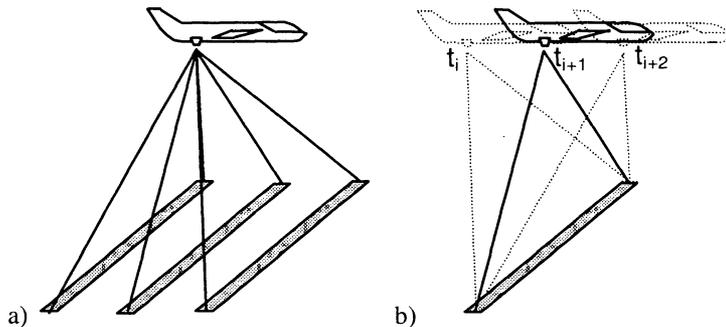
Os sistemas digitais de alta definição (ou resolução) são sistemas que possuem um grande número de elementos sensores (pixels) no plano focal. Em função do grande número de elementos sensores os sistemas desta natureza devem apresentar um desempenho elevado, de modo que o tempo de aquisição e armazenamento seja pequeno o suficiente para permitir a coleta de pares estereoscópicos.

Um destes sistemas é o LMFS F-979F 9.2K x 9.2K CCD (*Lockheed Martin Fairchild Systems*). Este sistema é composto por uma câmara CCD matricial de 9216 x 9216 elementos sensores (84.934.656 pixels) no plano focal. Apesar de ter mais de 84 milhões de pixels, ela opera a uma taxa maior que 2 quadros/segundo. Esta relação n°. quadros/unidade de tempo varia de acordo com o modo de operação. Dentre os modos de operação tem-se o agrupamento de pixels 2x2 e 4x4 que faz com que esta taxa aumente para, por exemplo, 3,7 quadros/segundo no modo de agrupamento 2x2. A superfície ativa tem uma forma quadrada e diagonal igual a 4,5", que corresponde a um quadro de aproximadamente 80,6 x 80,6 mm. Os pixels são quadrados, de dimensão 8,75 x 8,75 µm, permitindo o seu uso para fins cartográficos (MATHEWS, 1998). Pela área útil deste sistema e pelas dimensões do pixel, pode-se observar que a imagem obtida é equivalente à imagem de uma câmara métrica, digitalizada considerando um pixel próximo de 25 x 25 µm. É importante notar que esta dimensão do pixel é freqüentemente utilizada na produção de ortofotos digitais por permitir um bom compromisso entre tamanho de arquivo e resolução espacial em algumas escalas (USGS, 1996).

Diversos são os sistemas de lentes que podem ser utilizados neste sensor, podendo-se considerar distâncias focais de 1" (25,4mm), 3" (76,2 mm) e 12" (304,8 mm), que correspondem a diferentes ângulos de abertura. Para se ter uma idéia da resolução deste sistema, o tamanho do pixel no terreno, considerando imagens tomadas a uma altura de vôo de 3000 m e distância focal de 304,8 mm, é da ordem de 9 cm. Uma característica interessante deste sistema é a compensação do movimento de arrastamento durante a aquisição da imagem por meio eletrônico, técnica esta denominada *On-Chip IMC (Image Motion Compensation)*.

## 5.2 SCANNER TRILINEAR

O *scanner* trilinear é um sistema baseado no uso de três sensores lineares simultaneamente. Cada um destes sensores registra uma faixa do terreno, sendo uma faixa na direção nadir, uma à frente e outra para trás. Com o deslocamento da aeronave e a aquisição contínua, cada porção da superfície é imageada três vezes, o que é importante em termos de recuperação da posição tridimensional. A figura 9 ilustra o princípio do *scanner* trilinear.



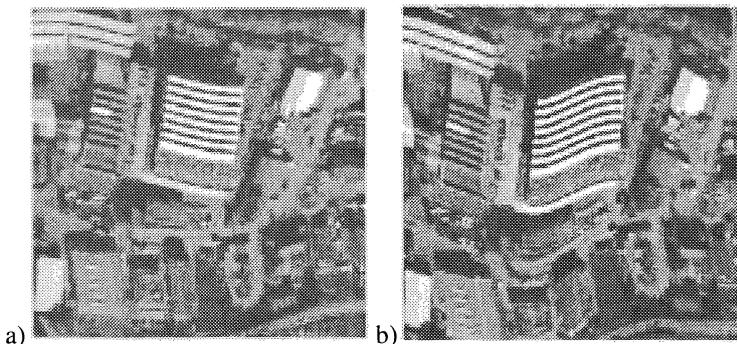
**Figura 9:** Princípio da aquisição de imagens pelo sensor trilinear. Em (a) são mostradas três faixas adquiridas simultaneamente nas direções (nadir, para a frente e para trás). Em (b) é mostrada uma faixa única do terreno, imageada em três instantes diferentes ( $t_i$ ,  $t_{i+1}$  e  $t_{i+2}$ ).

Para cada instante em que as três faixas são adquiridas, a atitude e a posição da aeronave são mantidas (figura 9(a)). No entanto, ao se agrupar as faixas correspondentes a uma mesma região, cada faixa apresentará deslocamentos em função da mudança de atitude e posição da aeronave para os instantes  $t_i$ ,  $t_{i+1}$  e  $t_{i+2}$  (figura 9(b)). Em função desta mudança de atitude normalmente se utilizam sensores inerciais (*INS - Inertial Navigation Systems*) e receptores GPS para a estimativa destas orientações e posições, o que facilita o processo de determinação da posição 3D dos pontos do espaço objeto, embora o uso do sistema inercial não seja obrigatório.

A figura 10 mostra o exemplo de duas imagens obtidas por um sensor desta natureza. Em 10(a) é mostrada a imagem formada pela junção das faixas adquiridas com o sensor direcionado para frente e em 10(b) com o sensor direcionado para o nadir. Como pode-se ver, os objetos são deformados em função da mudança de atitude de uma faixa para outra.

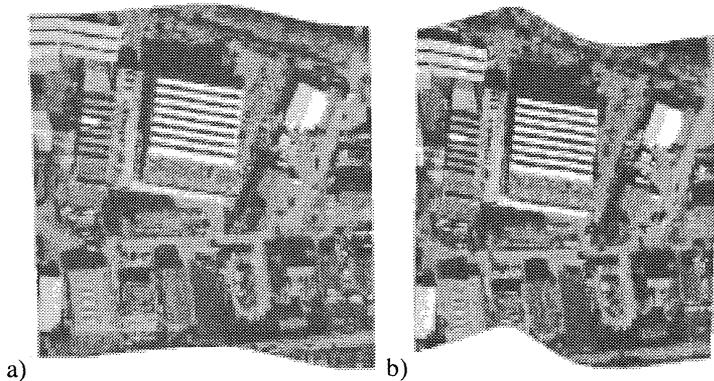
Se os parâmetros de orientação forem conhecidos para cada faixa, as imagens podem ser retificadas, eliminando o efeito mostrado na figura 10. Na figura 11 são apresentadas as imagens da figura 10 após a retificação.

Uma outra característica interessante deste sistema é a possibilidade de modificar o ângulo entre a direção nadir e as duas outras direções. Isto permite fazer a triangulação em diferentes geometrias, podendo-se escolher ângulos de interseção (ângulos estéreo) diferentes em função da aplicação e da topografia da área a ser mapeada. A figura 12 ilustra esta idéia mostrando a interseção em duas situações diferentes.

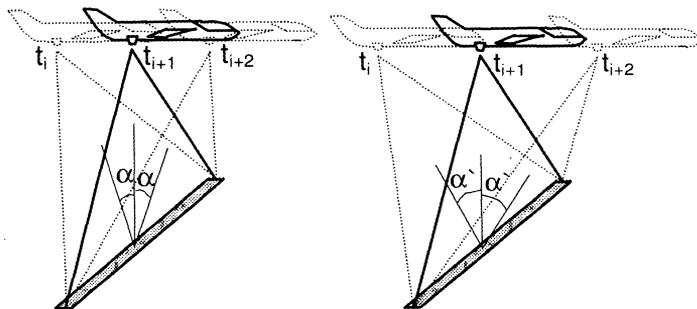


**Figura 10:** Imagens adquiridas com o sensor trilinear. Em (a) é mostrada a imagem formada ao agrupar as linhas do canal direcionado para a frente (*forward channel*) e em (b) a imagem obtida pelo canal direcionado para o nadir. (Adaptado de HAALA *et al.* (1998))

A empresa LH Systems, em conjunto com o DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt), estão desenvolvendo um sistema desta natureza. Sensores lineares com 12.000 pixels por linha já são disponíveis, e estão sendo desenvolvidos sistemas com tempos de integração mais rápidos, bandas multiespectrais e com linhas de 20.000 pixels ou mais (FRICKER *et al.*; 1999).



**Figura 11:** A imagem em (a) corresponde ao canal direcionado para a frente. Em (b) é mostrada a imagem direcionada para o nadir após o processo de retificação. (Adaptado de HAALA *et al.* (1998))



**Figura 12:** Esquema mostrando uma mesma área imageada em três instantes diferentes e por diferentes "ângulos estéreo" ( $\alpha$  e  $\alpha'$ ), que pode ser modificado em função da topografia da área mapeada e da aplicação.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de sistemas imageadores baseados em sensores do estado sólido tem crescido nos últimos anos, principalmente nas aplicações de Fotogrametria à curta distância. Alternativas de baixo custo, como o vídeo digital, tem sido pesquisadas para aplicações não cartográficas e para mapeamento rápido de pequenas áreas.

Dentre os fatores importantes na escolha da tecnologia digital pode-se destacar:

- a eliminação dos processos químicos de revelação dos negativos.
- a disponibilidade instantânea das imagens;
- flexibilidade em termos espectrais; e
- a possibilidade de obter produtos em quase tempo-real.

Por outro lado fatores limitantes e que estão sendo pesquisados são:

- a resolução, ainda inferior à resolução das câmaras métricas convencionais;
- a razão n°. quadros/unidade de tempo, que deve ser alta o suficiente para aplicações em tempo real e que somente algumas câmaras de alto custo é que possuem esta relação aceitável;
- a relação custo/área imageada que atualmente é menor para as imagens adquiridas com câmaras métricas convencionais.

Estas limitações têm sido minimizadas, principalmente pelos sistemas sensores lineares e trilineares, esperando-se para os próximos anos uma maior utilização de sistemas de coleta digitais aerotransportados para aplicações cartográficas em escalas grandes.

**NOTA DOS AUTORES:** Uma versão preliminar deste artigo, denominada “*MAPEAMENTO EM ESCALAS GRANDES E AS MODERNAS TECNOLOGIAS DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS*”, foi apresentada no evento ExpoGEO 99, em maio de 1999, Curitiba PR.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. B. de; *Fotogrametria*. Curitiba, 258p., 1998.
- DOWMAN, I.J. Fundamentals of Digital Photogrammetry. In: Close Range Photogrammetry and Machine Vision. ATKINSON, K, B.(ed.), Whittles Publishing, Scotland, UK, 371p., 1996.
- FRICKER, P.; SANDAU, R.; WALKER, A. S.; Airborne Digital Three-lines Sensor - Multispectral sensor with photogrammetric precision, *GIM International*, Vol. 13, 6, June, 1999.
- GALO, M. : Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais. Dissertação. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba Pr. 1993.
- GRUEN, A; Towards Real Time Photogrammetry. 41<sup>th</sup> Photogrammetric Week, Stuttgart, September, 1987.
- HAALA, N.; STALLMANN, D.; CRAMER, M.; Calibration of directly measured position and attitude by aerotriangulation of three-line airborne imagery, *ISPRS Commision III*, Working Group 1, 1998.
- LAURIN, D. G. A; Videometric System For a Flexible Space Structure Emulator, *ISPRS - Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 48 - 4 (1993) 02-11.
- LIGHT, D. L.; Film cameras or digital sensors? The challenge ahead for aerial imaging, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62, No. 3, pp. 285-291, March 1996.
- LUCCA FILHO, J.; Implementação Modular da Técnica de Compressão e Descompressão JPEG para Imagens. *Dissertação. Instituto de Física de São Carlos. Universidade de São Paulo - USP*. 1994

- MATHEWS, B.; An ultra high resolution, eletro-optical framing camera for reconnaissance and other applications using a 9216x9216 pixel, wafer scale, focal plane array, *SPIE Conference*, 22-24 July, 1998.
- SHORTIS, M. R.; BEYER, H. A; Sensor technology for digital photogrammetry and machine vision. In: Close Range Photogrammetry and Machine Vision. ATKINSON, K, B.(ed.); Bristol, Whittle Publishing, 371p., 1996.
- TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. L.; Técnicas de calibração de câmaras em visão computacional, *Jornada EPUSP/IEEE em Computação Visual*, Dezembro, 1990.
- U. S. Geological Survey; *Standards for Digital Orthophotos*, National Mapping Program, Technical Instructions. <http://tmmcweb.cl.usgs.gov/public/mmpstds/dagstds.html>, 1998
- WRIGHT, R.; Airborne Videography: Principles and Practice, *Photogrammetric Record*, 14(81), 447-457, 04-1993.

(Recebido em 22/02/00. Aceito para publicação em 10/07/00.)