

## Simulações de Vôos fotogramétricos com o Método de Monte Carlo

Daniel Carneiro da Silva, *UFPR Curitiba*

Quintino Dalmolin, *UFPR Curitiba*

1. Introdução
2. Considerações iniciais
3. Algoritmo
4. Análises dos resultados das simulações
  - 4.1 Limitações
5. Conclusões
6. Referências Bibliográficas

► **Resumo**

### 1. Introdução

O planejamento de vôos fotogramétricos é feito a partir da coleta de vários tipos de informações sobre a área a ser levantada. Entre elas, há a necessidade de conhecimento sobre a frequência de dias de céu completamente claro, a partir da qual serão estimados os tempos útil, e espera em solo, de toda tripulação e equipamentos. Esse tipo de informação interfere diretamente no cálculo de custos e dependendo da região ou época do ano pode inviabilizar o serviço. Os dados sobre condições favoráveis de nebulosidade para fins fotogramétricos são dados em forma de tabelas ou mapas. Para o Brasil estão disponíveis os mapas de (Girardi, 1975), (Chede & Chede, 1985), 1<sup>o</sup>/6<sup>o</sup> Grupo de Aviação (GAV) da Aeronáutica e para a região Nordeste um conjunto formado por um cartograma e uma tabela elaborados por (Silva & Dalmolin, 2000).

Existem vários métodos que podem ser utilizados para se estimar o tempo parado a partir da frequência de céu claro, como o usado por algumas empresas filiadas a Associação Nacional de Empresas de Aerolevantamentos (ANEA) ou por análise combinatória. Esses métodos simplificam a questão considerando que as ocorrências são estatisticamente independentes e não permitem que se façam análises mais elaboradas, o que é possível usando o método de simulações de Monte Carlo (Gilks, et al, 1995; Meyer, 1954; Metropolis, 1949). As estatísticas e simulações para planejamento de missões de imageamento por satélite foram estudadas e financiadas inicialmente pela NASA, nos anos 60, (Chang & Willard, 1972; Greaves et Al; 1971; Salomonson, 1969; Sherr et Al;, 1968), com os objetivos de prever a efetividade de cobertura em função da nebulosidade e melhor horário.

Simulações para levantamentos fotogramétricos devem dar ao planejador de missões de vôo informações sobre as probabilidades de sucesso de se executar um serviço em determinada região, numa certa época do ano. Devem ser respondidas perguntas do tipo: “Quantos dias ou horas serão gastos a um nível de confiança de 95% para fotografar 100% da área x ?”. Ou, caso exista alguma restrição de limite de tempo para a execução do serviço: “Com qual nível de confiança pode-se esperar fotografar a área x em y horas ?”.

As simulações, para serem efetuadas, necessitam de um modelo do comportamento da ocorrência de cobertura das nuvens. Segundo (Gringorten, 1971,1966) e outros autores, o

processo meteorológico da nebulosidade pode ser adequadamente modelado por cadeias de Markov. Mesmo que a distribuição de probabilidade (frequência) da variável aleatória não seja normal, considera-se que a variável pode ser transformada em uma nova variável  $Y$  que obedece à distribuição normal padrão,  $N(0,1)$ . O processo para realizar essa conformação de variáveis pode ser feito usando o método de Monte Carlo, que funciona com base no Teorema do Limite Central (Ross,1997).

Nesse trabalho o método de Monte Carlo, foi aplicado a um algoritmo usado originalmente para simulações de imageamento por satélites. Este trabalho além de detalhar o algoritmo usado, compara os resultados das simulações com as alterações introduzidas, e com base nesses resultados verifica a viabilidade de uma solução de mapeamento chamado de incremental, para as regiões de baixa frequência de céu claro, como ocorre no Nordeste do Brasil.

## 2. Considerações iniciais

O método de simulação de Sherr et al (1968) usado por Greaves et al(1971) e Brown(1969) foi desenvolvido originalmente para estimar as probabilidades de sucesso de imageamento por satélite, sendo que Silva(2001) o adaptou para vôos fotogramétricos que apresentam algumas diferenças significativas. No algoritmo básico foram introduzidas modificações, sobretudo na parte relacionada a diferenças de escala de espaço e de tempo entre as tomadas das imagens:

- Os vôos fotogramétricos têm áreas por fotografias muito menores que as áreas imageadas por um satélite. Por exemplo, a área fotografada no terreno para as escalas de 1:5.000, 1:20.000 e 1:40.000, com uma câmara de distância focal de 153mm e fotografia no formato 23cmx23cm, são respectivamente de 1,14km x 1,14km; 4,57km x 4,57km; 9,14km x 9,14km, contra os 185 km x 185 km da imagem Landsat TM.
- A repetibilidade de passagem do satélite é de vários dias enquanto o tempo de revão de uma faixa pode ser de poucos minutos.
- As imagens de satélites normalmente têm pequena escala e podem formar mosaicos de extensas áreas para aplicações em estudos que exigem pouca precisão posicional. Já as escalas das fotografias são maiores, necessitam do recobrimento estereoscópico e são usadas em forma de blocos. A formação dos blocos, por exigências técnicas e conveniências operacionais da etapa de fototriangulação e restituição, deve ser feita preferencialmente de forma contínua, faixa a faixa, sem interrupções .

As particularidades discutidas acima mostram que a área levantada numa missão de vôo fotogramétrico pode resultar em dezenas de fotografias que podem ser obtidas em um horário mais flexível, diferente do resultado equivalente de um satélite, que registra apenas uma imagem por dia, em horário fixo (normalmente pela manhã).

Nesse trabalho, o número de tentativas tem o mesmo significado de quantidade de dias consecutivos que se leva até fotografar 100% de uma área, ou o tempo em dias de duração de uma missão de vôo com sucesso. A definição do tamanho dessa área padrão é feita a partir da representatividade espacial e temporal dos dados meteorológicos.

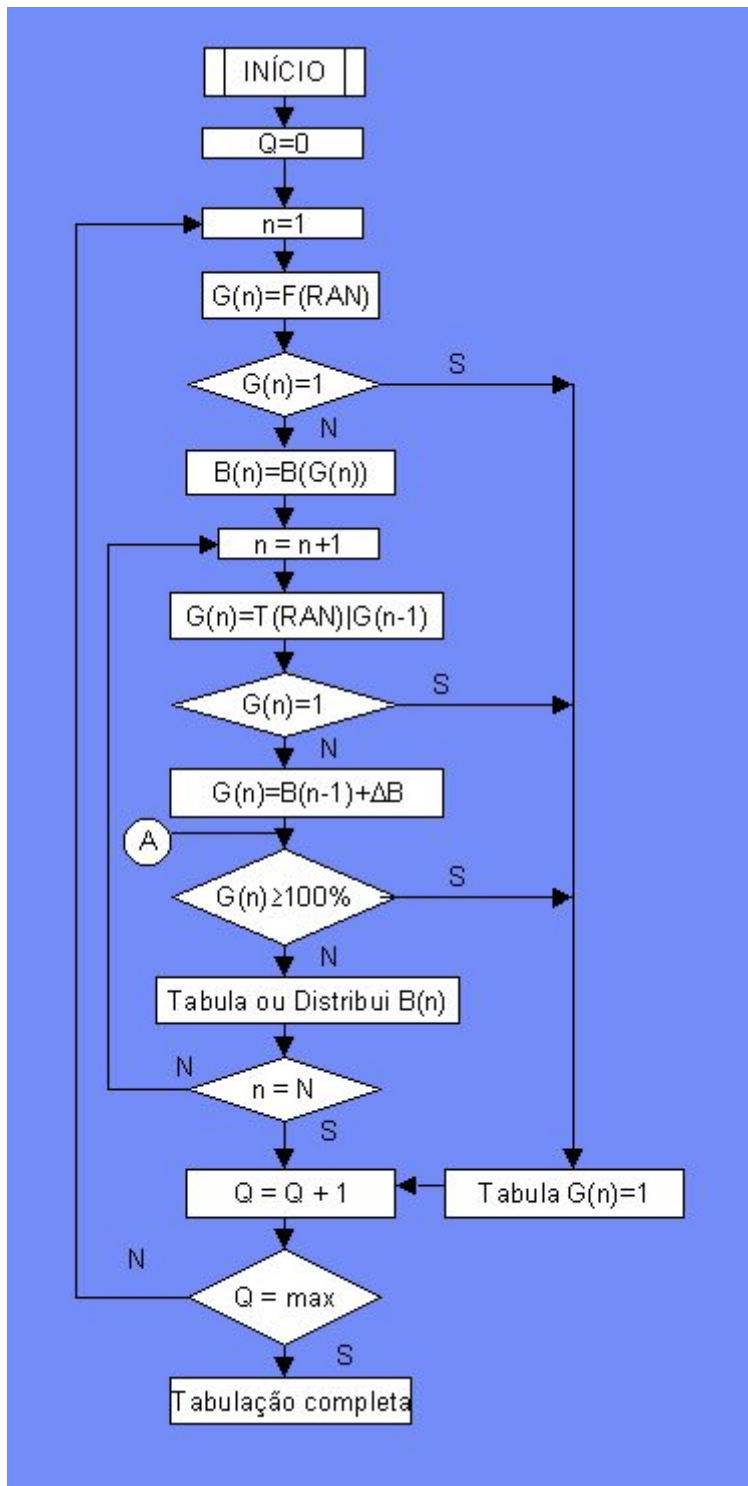
Os dados usados são observações de nebulosidade fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e processados por Silva (2001). As observações são realizadas em superfície pela rede de estações meteorológicas do INMET e são coletadas diariamente às 12h, 18h e 24h Universal Time Coordinated (UTC). Toda a área de estudo encontra-se na faixa que são três horas a menos em relação à UTC de forma que as horas locais de observação são respectivamente 9h, 15h e 21h. Para a pesquisa, os dados utilizados foram apenas os registros de nebulosidade das 12h e 18h UTC, visto que o horário de 24h UTC que corresponde a 21h locais está fora do período útil para a execução de vôos fotogramétricos. Segundo algumas análises feitas por Silva (2001), comparando as estatísticas da manhã e

tarde é razoável supor que o registro de uma ocorrência de céu completamente claro indica que essa situação permanece por um período de quatro horas, portanto esse é o tempo disponível para a realização do voo.

A quantificação é realizada em décimos do céu encoberto pelas nuvens. O observador divide o céu em partes iguais e imagina que juntando as nuvens de um lado para o outro tenha por exemplo 50% ou 25% do céu encoberto e daí faz as aproximações necessárias. Os códigos variam numa escala de 0 a 10, sendo que o 0 corresponde a céu totalmente limpo, 1 a céu com 10%, 2 a céu com 20%, e assim por diante, até 10 com céu completamente encoberto.

O raio de visibilidade considerado válido para um observador depende da altura da base da nuvem, mas se fixando uma área de 3000km<sup>2</sup> se chega a um raio de cerca de 30km, o que está em acordo com diversos autores (Silva, 2001). Portanto os dados disponíveis e os resultados das simulações são representativos para uma unidade de tempo que corresponde a um período de quatro horas e a uma unidade de área que corresponde a 3000km<sup>2</sup>.

### **3. Algoritmo**



**Figura 1 : Algoritmo do Método de Monte Carlo**

(Fonte: Greaves et al., 1971)

O algoritmo básico (Figura 1) usado para as simulações com o método de Monte Carlo, foi usado originariamente por Greaves et al. (1971) e Chang & Willard (1972) para simulações de imageamento por satélite, no qual considerava-se que a área da imagem era igual a própria área a ser mapeada. Esse algoritmo, com algumas adaptações, pode ser aplicado para vôos fotogramétricos. Os resultados das simulações dão as probabilidades de sucesso, a um certo nível de confiança, e o número de tentativas que são necessárias para fotografar 100% da área. A apresentação dos resultados é feita sob forma de gráficos.

O algoritmo foi implementado num programa em Pascal chamado de M CARLO, que usa como dados de entrada as Matrizes de Probabilidades Incondicionais (MPI) e Matrizes de Probabilidades Condicionais Temporais (MPCT), obtidas a partir de dados de observação de superfície (OS) do INMET. A MPI corresponde as frequências médias de observações diárias, numa série de dez anos, de cada classe de nebulosidade de 1 a 10, mês a mês, para os horários de 12 e 18UTC separadamente. A MPCT é obtida das relações entre as ocorrências de classes no dia n e as classes que ocorreram no dia n+1, isto é, com 24 h de intervalo, para cada mês do ano. A tabela 1 mostra uma MPI das 12UTC, e a tabela 2 mostra MPCT, apenas do mês de Outubro, respectivamente para a estação de Triunfo.

Antes do uso do programa principal, as estatísticas de cobertura de nuvens (MPI e MPCT) são transformadas em números decimais e colocadas em forma acumulada, de modo que a categoria de total nebulosidade seja £ 1,0. São então inicializados o número da passagem N e o número da missão Q. Em seguida, é gerado um número aleatório RAN, uniformemente distribuído no intervalo 0 a 1. Com esse número, entra-se na matriz de probabilidade acumulada no intervalo, que contém RAN, e se encontra a classe de cobertura correspondente G(n). Se a classe de cobertura selecionada G(n) é 1, isto é, céu 100% claro, então se considera que toda a área foi fotografada e a missão está completa. Se a classe de cobertura não é 1, então a área imageada tem tamanho B. A área B é função da classe de cobertura de nuvens e vai sendo acumulada em cada tentativa, enquanto o número da tentativa é incrementado de um. Um novo número aleatório RAN é gerado e uma segunda classe de cobertura de nuvens é selecionada. Este processo continua até que a área imageada seja 100% ou que se atinja um número fixo de passagens N pré-determinado.

Tabela 1 : MPI- Matriz de Probabilidade Incondicional da Estação Triunfo 12UTC

<i>Estação Triunfo 12 UTC</i>													
<i>82789</i>	<i>12</i>	<i>Meses</i>											
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
<i>10</i>	<i>19.4</i>	<i>16.0</i>	<i>19.8</i>	<i>15.7</i>	<i>22.4</i>	<i>19.1</i>	<i>13.5</i>	<i>29.6</i>	<i>50.5</i>	<i>40.1</i>	<i>35.4</i>	<i>32.0</i>	
<i>20</i>	<i>14.9</i>	<i>16.4</i>	<i>13.0</i>	<i>15.7</i>	<i>11.0</i>	<i>6.5</i>	<i>5.3</i>	<i>12.9</i>	<i>12.4</i>	<i>15.1</i>	<i>18.3</i>	<i>18.0</i>	
<i>30</i>	<i>2.8</i>	<i>2.7</i>	<i>3.2</i>	<i>1.3</i>	<i>1.1</i>	<i>1.7</i>	<i>3.0</i>	<i>2.2</i>	<i>1.0</i>	<i>5.7</i>	<i>0.8</i>	<i>2.2</i>	
<i>40</i>	<i>8.9</i>	<i>13.3</i>	<i>13.8</i>	<i>11.7</i>	<i>7.7</i>	<i>7.8</i>	<i>6.0</i>	<i>4.3</i>	<i>7.6</i>	<i>12.2</i>	<i>11.3</i>	<i>11.5</i>	
<i>50</i>	<i>10.1</i>	<i>10.7</i>	<i>7.3</i>	<i>5.4</i>	<i>3.7</i>	<i>4.3</i>	<i>6.4</i>	<i>5.4</i>	<i>6.2</i>	<i>9.0</i>	<i>8.8</i>	<i>9.4</i>	
<i>60</i>	<i>12.1</i>	<i>5.3</i>	<i>8.5</i>	<i>9.0</i>	<i>7.7</i>	<i>7.0</i>	<i>6.0</i>	<i>6.5</i>	<i>5.7</i>	<i>6.1</i>	<i>5.4</i>	<i>9.0</i>	
<i>70</i>	<i>11.7</i>	<i>12.9</i>	<i>10.9</i>	<i>8.1</i>	<i>5.9</i>	<i>8.7</i>	<i>7.9</i>	<i>9.1</i>	<i>6.7</i>	<i>4.3</i>	<i>8.3</i>	<i>3.6</i>	
<i>80</i>	<i>3.2</i>	<i>7.1</i>	<i>4.5</i>	<i>7.6</i>	<i>5.1</i>	<i>4.8</i>	<i>6.4</i>	<i>4.3</i>	<i>2.9</i>	<i>1.4</i>	<i>2.1</i>	<i>2.9</i>	
<i>90</i>	<i>7.7</i>	<i>8.9</i>	<i>8.9</i>	<i>13.0</i>	<i>10.3</i>	<i>7.0</i>	<i>7.9</i>	<i>6.5</i>	<i>4.8</i>	<i>3.9</i>	<i>5.8</i>	<i>9.0</i>	
<i>100</i>	<i>9.3</i>	<i>6.7</i>	<i>10.1</i>	<i>12.6</i>	<i>25.0</i>	<i>33.0</i>	<i>37.6</i>	<i>19.4</i>	<i>2.4</i>	<i>2.2</i>	<i>3.8</i>	<i>2.5</i>	

Tabela 2 : MPCT Matriz de Probabilidade Condicional Temporal de Triunfo, mês de Setembro das 12UTC

Estação Triunfo 12 UTC Setembro										
82789	9	12	Classes de Cobertura em %							
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	64.7	10.8	1.0	6.9	3.9	4.9	3.9	2.9	1.0	0.0
20	40.0	12.0	0.0	4.0	4.0	16.0	8.0	0.0	4.0	12.0
30	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	43.8	12.5	6.3	0.0	6.3	0.0	25.0	0.0	0.0	6.3
50	53.8	7.7	0.0	15.4	15.4	0.0	0.0	7.7	0.0	0.0
60	50.0	25.0	0.0	8.3	0.0	0.0	8.3	0.0	8.3	0.0
70	23.1	15.4	0.0	7.7	15.4	7.7	7.7	7.7	15.4	0.0
80	33.3	0.0	0.0	16.7	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90	10.0	20.0	0.0	10.0	0.0	10.0	10.0	0.0	30.0	10.0
100	0.0	20.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0	20.0	40.0	0.0

#### 4. Análises dos resultados das simulações

Havendo disponibilidade de matrizes de probabilidades para as áreas de interesse é possível realizar simulações para todos os meses do ano e para qualquer região, basta escolher a estação mais próxima e usar os resultados diretamente.

Foram executadas simulações com o programa MCARLO com dados da estação Triunfo, , para setembro, considerado o mês mais favorável, ou seja, o mês que apresenta a maior frequência da classe 1, conforme a tabela 1. Para triunfo o horário de 12 UTC apresenta mais céu claro que as 18 UTC. No caso de estações muito próximas do litoral ocorre o contrário, o período da tarde é menos nublado. A figura 2 mostra uma tabela com as saídas do programa, considerando apenas a classe 1 (coluna 1c), com as classes 1, 2 e 3 (coluna 3c) e com as dez classes (coluna 10c); o gráfico mostra para uma, três e dez classes o número de tentativas é respectivamente seis, cinco e três.

Os resultados das simulações são dados em número de tentativas e em probabilidades para fotografar 100% da área. O número de tentativas é a quantidade de dias gastos até que a área esteja completamente imageada, visto que as matrizes de probabilidades condicionais que entram na simulação referem-se a intervalos de 24h. As probabilidades que aparecem nos gráficos e tabelas são na verdade o nível de confiança do resultado. No caso de estações com muita nebulosidade o número de tentativas é muito grande, e considerou-se estatisticamente aceitável adotar o nível de confiança de 95% para definir o número de tentativas que completa o levantamento.





#### 4.1 Limitações

O período útil estimado de quatro horas dificilmente será todo aproveitado numa tentativa de vôo, devido a fatores como tempo gasto na mobilização, decolagem, subida e deslocamento até a área do serviço, procedimentos de tomada de faixas, limitação do tamanho do filme e autonomia de vôo da aeronave. Tendo isso em conta, a sugestão para aplicar os resultados das simulações obtidas com o algoritmo e alterações já discutidos, em planejamento de vôos fotogramétricos, é considerar o seguinte:

1. a simulação é válida para fotografar uma área de tamanho e escala variáveis que possa ser concluída num intervalo de quatro horas e até a área máxima de 3000km<sup>2</sup>. Essa será a nova área padrão.
2. Se toda a área pode ser voada dentro desse intervalo utiliza-se diretamente o número de tentativas obtido na simulação.
3. Se a área total é maior que a área de referência, considerar que cada área de referência é independente e se multiplica o número de tentativas da simulação pela relação (área total)/ (área padrão).

#### 5. Conclusões

O uso de simulações de sucesso de vôos com o método de Monte Carlo, mostrou-se viável e um importante auxiliar, para o planejamento de levantamentos fotogramétricos, inclusive para regiões onde a nebulosidade é muito alta.

O método pode ser melhorado com a inclusão de rotinas que considerem diretamente as dimensões da área a levantar e escala das fotografias. Além disso para que o método possa ser usado facilmente pela empresas de aerolevantamentos, no entanto, deve-se organizar um banco de dados das freqüências de nebulosidade de todo o Brasil, e desenvolver um sistema de programas de computador, que tenha interações com o usuário, saídas gráficas e impressão de relatórios.

#### 6. Referências Bibliográficas

- [1] 1º/6º Grupo de Aviação.: *Climatologia Mensal*, Recife: Base Aérea, Seção de Informações do Setor de Planejamento Meteorológico, Cartogramas de janeiro a dezembro 19??
- [2] Brown,S.C.: *A Cloud-Cover Simulation Procedure*, *Astronautics & Aeronautics*, v. 17, n. 8, p. 86-88. Aug 1969
- [3] Brown,S.C.: *Simulating the Consequence of Cloud Cover on Earth-Viewing Space Mission*, *Bulletin American Meteorological Society*. V. 2, n. 51, p. 126-131. 1970
- [4] Chang,D.T; Willard,J.H.: *Futher Developments in Cloud Statistics for Computer Simulations*, NASA Contractor Report CR-61389. Alabama: NASA George C. Marshall Space Flight Center, 1972. 109 p.
- [5] Chede,F.C; Chede,I.C.G.: *Estudo das Regiões Climatológicas Brasileiras e a sua Utilização Prática na Aerofotogrametria*, 2 ed. Rio de Janeiro: Escola de Aperfeiçoamento e Preparação da Aeronáutica Civil, 45 p, 1985
- [6] Gilks,W.R; Richardson,S; Spiegelhalter,D.J.: *Markov Chain Monte Carlo in Practice*,



Londres: Chapman & Hall. 486 p. 1995

- [7] Girardi,L.C.: *Áreas e Épocas Favoráveis aos Vãos Aerofotogramétricos*, IAE-M-03/73. S. José dos Campos: Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Atividades Espaciais.1973. 22p.
- [8] Greaves,J.R; Spiegler,D.B; Willand,J.H.: *Development of a Global Cloud Model for Simulating Earth-Viewing Space Missions*, NASA Contractor Report CR-61345. Alabama: NASA George C. Marshall Space Flight Center. 1971. 133 p.
- [9] Gringorten,I.I.: *A Stochastic Model of the Frequency and Duration of Weather Events*, Journal of Applied Meteorology. V. 5, p. 606-624. Oct 1966
- [10] Gringorten,I.I.: *Modelling Conditional Probability*, Journal of Applied Meteorology. V. 10, p. 646-657. aug 1971
- [11] Kristjansson,J.E.: *Cloud Parametrization at Different Horizontal Resolutions*, Quartenary Journal of Royal Meteorological Society. n. 117, p.1255-1280. 1991
- [12] Metropolis,N.U.: *The Monte Carlo Method*, Journal of the American Statistical Association. v. 44, n. 247, p. 335-341. Sep 1949
- [13] Meyer,A.H.(Ed): *Symposium on Monte Carlo Methods*, University of Florida: John Wiley & Sons, Inc. 1954
- [14] Ross,S.M.: *Introduction to Probability Models*, 5th ed. San Diego, EUA: Academic Press, 1993
- [15] Sherr,P.E; et.al.: *World Wide Cloud Cover Distribution for use in Computer Simulations*, NASA CR -61226. Allied Research Associates, Inc. 1968
- [16] Salomonson,V.: *Cloud Statistics in Earth Resouces Technology Satellite (ERTS) Mission Planning*, NASA TM X-63674, Mariland, EUA: Goddard Space Fligth Center, 1969, 19p.
- [17] Shenk,W.E.; Salomonson,V.: *A Simulation Study Exploring the Effects of the Sensor Spatial Resolution on Estimates of Cloud Cover from Satellites*, NASA TN-D6247. Mariland, EUA: Goddard Space Flight Center. 10p. 1971
- [18] Silva,D.C; Dalmolin,Q.: *Mapa de Céu Claro para uso em Aerofotogrametria*, In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário - Cobrac 2000, Florianópolis, Anais (CD), UFSC Florianópolis 2000
- [19] Silva,D.C.: *Métodos para Tratamento de Dados de Nebulosidade para Fins Fotogramétricos*, Tese de Doutorado em Ciências Geodésicas. Curitiba: Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. 235 p. 2001

**Autores**

**Prof. Dr. Daniel Carneiro da Silva**  
Universidade Federal de  
Pernambuco  
Departamento de Engenharia  
Cartográfica  
Av Acadêmico Hélio Ramos, S/N  
50670-901 Recife PE - Brasil  
✉ [danielcs@ufpe.br](mailto:danielcs@ufpe.br)

**Prof. Dr. Quintino Dalmolin**  
Universidade Federal do Paraná  
Centro Politécnico- Jardim da  
Américas  
Curso de Pós-Graduação em Ciências  
Geodésicas  
97040-500 Curitiba PR - Brasil  
✉ [dalmolin@geoc.ufpr.br](mailto:dalmolin@geoc.ufpr.br)