

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA NUCLEAR**

**VANUSA DE ABREU ALVES**

**AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO DO PÚBLICO EM VOOS DOMÉSTICOS NO  
BRASIL**

**Rio de Janeiro  
2013**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**VANUSA DE ABREU ALVES**

**AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO DO PÚBLICO EM VOOS DOMÉSTICOS  
NO BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientadores:

Prof<sup>ª</sup>. Elaine Rua Rodriguez Rochedo- D.C.

Prof<sup>ª</sup>. Nadya Maria Prado Damasceno Ferreira- D.C.

**Rio de Janeiro  
2013**

c2013

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que não tenha finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e do orientador.

621.48      Alves, Vanusa de Abreu  
A474a      Avaliação da exposição do público em voos domésticos  
no Brasil. / Vanusa de Abreu Alves; orientado por Elaine Rua  
Rodríguez Rochedo, Nadya Maria Prado Damasceno Ferreira.  
– Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2013.

81 p.: il.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia –  
Rio de Janeiro, 2013.

1. Engenharia Nuclear. 2. Radiação Cosmica. 3. Exposição  
do publico em voos. I. Rochedo, Elaine Rua Rodriguez . II.  
Ferreira, Nadya Maria Prado Damasceno. III. Título. IV.  
Instituto Militar de Engenharia.

CDD 621.48

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**VANUSA DE ABREU ALVES**

**AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO DO PÚBLICO EM VOOS DOMÉSTICOS  
NO BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Prof<sup>ª</sup>. Elaine Rua Rodriguez Rochedo - D.C.

Prof<sup>ª</sup>. Nadya Maria Prado Damasceno Ferreira - D.C.

Aprovada em 07 de Fevereiro de 2013, pela seguinte Banca Examinadora:

---

Prof<sup>ª</sup>. Elaine Rua Rodriguez Rochedo - D.C. do IME – Presidente.

---

Prof<sup>ª</sup>. Nadya Maria Prado Damasceno Ferreira - D.C. do IME.

---

Prof<sup>º</sup>. Edson Ramos de Andrade – D.C. do CTEEx.

---

Dra. Jane Shu – D.C da CNEN.

Rio de Janeiro  
2013

Dedico este trabalho aos meus pais Hermino e Rosa, pelo apoio compreensão e incentivo em todos os momentos desta e de outras caminhadas.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem Ele, nada seria possível;

A toda minha família. Aos meus pais Hermino Alves Neto e Rosa Maria de Abreu Alves pelo apoio incondicional e incentivo, por estarem sempre presente na realização dos meus sonhos, pelas orações, amor e confiança que sempre depositaram em mim. A minha irmã Vanessa de Abreu Alves Linhares pela preocupação, amor e carinho que sempre demonstrou, apesar de estarmos distantes;

Ao meu amigo e namorado Christiano De Luca por estar compartilhando esta etapa comigo, pela paciência, compreensão, apoio e por está comigo todos os momentos bons e ruins pelos quais passamos junto;

À minha orientadora Professora Dra. Elaine Rua Rodriguez Rochedo pela confiança, oportunidade de trabalhar ao seu lado, amizade, seriedade, ajuda, compreensão das dificuldades enfrentadas e por sua cumplicidade e responsabilidade direta na construção desta Dissertação;

À minha co-orientadora Professora Dra. Nadya Maria Prado Damasceno Ferreira, pela infinita disponibilidade, por todos os ensinamentos e por sempre se mostrar atenciosa e prestativa;

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia pelo amadurecimento acadêmico e conhecimento oferecido durante a realização do curso de Mestrado;

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de estudo e auxílio financeiro que possibilitou a dedicação integral ao programa de pós-graduação;

Agradeço e peço desculpas a todos que contribuíram de alguma forma comigo e agora não recordo;

A todos que contribuíram com esta caminhada o mais profundo agradecimento.

“Só os que se arriscam a ir longe demais são capazes de descobrir o quão longe se pode ir.”

T.S. Eliot

## SUMARIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9	
LISTA DE TABELAS.....	11	
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	13	
LISTA DE SIGLAS.....	14	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	Relevância científica.....	20
1.2	Objetivos.....	20
1.3	Organização do trabalho .....	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>22</b>
2.1	Radiação cósmica .....	22
2.1.1	Efeitos da altitude .....	26
2.1.2	Efeitos latitude .....	26
2.1.3	Radiação solar.....	27
2.2	Radiação Cósmica em voos .....	28
2.3	Programa Computacional CARI-6 .....	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>34</b>
3.1	Banco de dados.....	34
3.1.1	Validação.....	35
3.1.2	Código IATA e ICAO.....	36
3.1.3	Frequência semanal .....	36
3.1.4	Correção do horário de verão .....	36

3.1.5	Dados de altitude e tempo de subida de descida do voo .....	37
3.1.6	Número de passageiros.....	38
3.2	Cálculo da Dose .....	39
3.3	Análise de incertezas.....	40
3.3.1	WinGraf .....	42
3.3.2	Crystal Ball® .....	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
4.1	Banco de dados.....	45
4.2	Análise de Fontes de variabilidade e incerteza relativa aos dados de entrada para o programa de cálculo de dose .....	47
4.3	Cálculo de dose .....	50
4.3.1	Estados brasileiros .....	51
4.3.2	Voos específicos.....	56
4.4	Análise de Incerteza .....	60
4.4.1	Resultados da Análise de Incertezas.....	63
4.4.2	Análise de sensibilidade paramétrica .....	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO 1</b>	<b>.....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1 Representação das interações das partículas da radiação cósmica primaria com a atmosfera, originando raios cósmicos secundários. ....	23
FIG. 2.2: Componentes de taxa equivalente de dose devido à radiação cósmica na atmosfera.....	24
FIG. 2.3: Cinturão de de Van Allen.....	25
FIG. 2.4 Variação da atividade solar ao longo do tempo.....	27
FIG. 2.5 Relação da dose devido à radiação cósmica em relação a um voo de ida e volta entre Frankfurt e Nova York, no período de 1980 a 2005 .....	28
FIG. 2.6 CARI-6 versão DOS. ....	31
FIG. 2.7 CARI-6 versão <i>online</i> .....	32
FIG. 3.1 . Aeroportos incluídos nas simulações. ....	41
FIG. 3.2 Curvas das distribuições de probabilidade. ....	43
FIG. 4.1 Exemplo do banco de dados criado com as informações sobre o voo.....	46
FIG. 4.2 Doses estimadas nos voos realizados do Rio de Janeiro a Porto Alegre no mesmo mês em anos diferentes.....	48
FIG. 4.3 Doses estimadas nos voos realizados do Rio de Janeiro a Porto Alegre para diferentes meses do mesmo ano.....	48
FIG. 4.4 População estadual. ....	53
FIG. 4.5 Dose coletiva relativa à voos com origem em cada estado.....	53
FIG. 4.6 Relação entre o número de passageiros e a população estadual total. ....	54
FIG. 4.7 Relação entre a dose coletiva e a população residente de cada estado do Brasil.....	54

FIG. 4.8 Relação entre a dose coletiva e a população residente de cada estado do Brasil, exceto o Distrito Federal.....	55
FIG. 4.9. Número de voos por ano partindo de cada estado.....	55
FIG. 4.10 Taxa de dose em voos domésticos a partir ou para a cidade do Rio de Janeiro.....	59
FIG. 4.11 Número de passageiros em diferentes rotas de e para a cidade do Rio de Janeiro.....	59
FIG. 4.12 Distribuição utilizada para o parâmetro $f_a$ , representando a variabilidade possível de ser introduzida pelo ciclo solar. ....	61
FIG. 4.13 Distribuição utilizada para o parâmetro $f_b$ , representando a variabilidade possível de ser introduzida pela sazonalidade anual.....	61
FIG. 4.14 Distribuição utilizada para o parâmetro $f_c$ , representando a variabilidade associada a variações no tempo de voo na altitude de cruzeiro. ....	61
FIG. 4.15 Distribuição utilizada para o parâmetro $f_d$ , representando a variabilidade associada a variações na altitude média de cruzeiro. ....	62
FIG. 4.16 Distribuição gerada para as doses recebidas em voos entre as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo.....	64
FIG. 4.17 Distribuição gerada para as doses recebidas em voos entre as cidades do Rio de Janeiro e Distrito Federal. ....	65
FIG. 4.18 Distribuição gerada para as doses recebidas em voos entre as cidades de São Paulo e Distrito Federal.....	66

## LISTA DE TABELAS

TAB. 1.1 Distribuição de taxas de dose efetiva da população, devido à radiação cósmica ao nível do mar.....	18
TAB. 1.2 Efeito da altitude na taxa de dose absorvida devido à radiação cósmica na China.....	19
TAB. 1.3 Taxa de dose efetiva devido à radiação cósmica em cidades em altitudes elevadas.....	19
TAB. 2.1 Propriedades de algumas partículas de radiação cósmica presentes na atmosfera da Terra.....	24
TAB. 2.2: Valores medidos e calculados pelo código CARI-6.....	33
TAB. 3.1 Número de passageiros.....	38
TAB. 3.2 Localização dos aeroportos.....	41
TAB. 4.1 Taxa de dose dos voos com altitude de 34.000 pés para diferentes voos dentro do Brasil.....	49
TAB. 4.2 Resumo dos resultados das simulações.....	49
TAB. 4.3 Resumo dos resultados para voos com origem nos diferentes estados brasileiros.....	52
TAB. 4.4 Localização dos principais aeroportos do Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília.....	56
TAB. 4.5 Dose individual para passageiros em voos domésticos diretos entre as cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília.....	56
TAB. 4.6 Descrição estatística do código de voos da Cidade do Rio de Janeiro. ....	58
TAB. 4.7 Parâmetros das distribuições utilizadas para os fatores $f_a$ , $f_b$ , $f_c$ e $f_d$ .....	62

TAB. 4.8 Resumo Estatístico dos valores de D1 para a análise de incerteza. ....	63
TAB. 4.9 Resumo estatístico para a rota RJ-SP.....	64
TAB. 4.10 Resumo estatístico para rota RJ-DF.....	65
TAB. 4.11 Resumo estatístico para rota SP-DF. ....	66
TAB. 4.12 Resultados da análise de sensibilidade paramétrica na variância.....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

MB	–	Megabyte
mSv/a	–	Milisievert por ano
mSv	–	Milisievert
$\mu\text{Sv/h}$	–	Microsievert por hora
$\mu\text{Sv}$	–	Microsievert
nGy/h	–	Nano-Gray por hora
nSv/h	–	Nanosievert por hora
eV	–	Elétron volt
MeV	–	Mega elétron volt
GeV	–	Giga elétron volt
m	–	Metro
Km	–	Quilômetro
$\text{kg/m}^2$	–	Quilograma por metro quadrado

### SÍMBOLOS

$f_a$	–	Ciclo solar
$f_b$	–	Sazonalidade
$f_c$	–	Tempo de voo na altitude de cruzeiro
$f_d$	–	Altitude de cruzeiro
$\mu^\pm$	–	Múon
$e^\pm$	–	Elétron
$\gamma$	–	Fóton
$p$	–	Próton
$\pi^\pm$	–	Píon
$n$	–	Nêutron

## LISTA DE SIGLAS

AMAS	Anomalia Magnética do Atlântico Sul
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
DECEA	Departamento de Controle do Espaço
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
ICRP	Comissão Internacional de Proteção Radiológica
Infraero	Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
RCG	Radiação Cósmica Galáctica
RCS	Radiação Cósmica Solar

## RESUMO

A exposição à radiação cósmica em viagem aérea é significativamente maior do que em nível do solo e varia de acordo com a rota devido ao efeito da latitude, da altitude de voo, o tempo de voo, e do ano de acordo com os efeitos do ciclo solar no fluxo de radiação cósmica galáctica. O código computacional CARI-6, desenvolvido pela FAA (*U.S. Federal Aviation Administration*), calcula a dose efetiva de radiação cósmica galáctica recebida por um indivíduo em um avião a voar a rota mais curta entre dois aeroportos no mundo. O programa leva em conta as mudanças de altitude e localização geográfica durante a trajetória do voo, de acordo com o seu perfil, digitado pelo usuário. Embora originalmente desenvolvido para quantificar a exposição à radiação da tripulação, o código executa o cálculo da dose para um conjunto de dados de voo específicos fornecidos pelo usuário. O objetivo deste projeto é estimar a contribuição da exposição à radiação cósmica em voos comerciais domésticos para a população brasileira. Um banco de dados, incluindo cerca de 4.000 voos domésticos no Brasil, foi implementado em planilhas do Excel com base em dados de informação de voos realizados em novembro de 2011. Os principais dados incluídos no banco de dados são a origem e destino dos voos, hora de partida e chegada, o tipo de avião, número de passageiros, horários de voo e número de voos por ano. Estas informações foram utilizadas para estimar as doses individuais e coletivas decorrentes de voos comerciais no Brasil. Este trabalho pretende servir como base para futuras comparações sobre a exposição como consequência do crescimento da aviação civil no país. A relevância de qualquer estudo sobre a exposição à radioatividade natural e suas variações, particularmente neste caso, em que a exposição é voluntária, pode abrir novas perspectivas para discussões sobre o conceito de risco, sua avaliação e sua aceitação pública, que são aspectos relevantes a considerar ao definir diretrizes de proteção radiológica.

## ABSTRACT

The exposure to cosmic radiation from air traveling is significantly higher than that at ground level, varying according to the route due to the effect of latitude, flight altitude, flight time, and the year as a matter of the effect of solar cycle over the galactic cosmic rays flux. The computer code CARI-6, developed by the FAA (U.S. Federal Aviation Administration), is aimed to calculate the effective dose of galactic cosmic radiation received by an individual on an airplane, flying the shortest route between two airports in the world. The program takes into account the changes in altitude and geographic location during the flight course, according to the profile of the flight described by the user. Although originally developed to quantify the radiation exposure to aircrew, CARI-6 performs the dose calculation to the set of specific flight data provided by the user. The objective of this work is to estimate the contribution of the exposure to cosmic radiation on commercial flights for the Brazilian customers. The database, including approximately 4,000 domestic flights in Brazil, was implemented in Excel® spreadsheets based on data from flight information for November 2011 at all. Key fields included in the database are the origin and destination of the flight, time of departure and arrival, type of aircraft, number of passengers, flight schedules and number of flights per year. This information was used to estimate individual and collective doses. This work shall serve as a basis for future comparisons of exposure, looking after the growth of civil aviation activity in the country. The relevance of any study of exposure to natural radioactivity and its technological increases demand, particularly in this case of voluntary exposure, should open new perspectives for discussions on the concept of risk evaluation and its public acceptance, which are outmost importance to consider when setting up guidelines for radiological protection.

## 1 INTRODUÇÃO

A radiação sempre esteve presente na biosfera, onde a vida se desenvolveu. A maior contribuição, para as várias exposições à radiação recebidas pelo homem, vem de fontes naturais. Uma característica da irradiação natural é que ela vem sendo recebida por toda a população do mundo, por um longo período de tempo, a uma taxa relativamente constante. De um modo geral, a exposição do homem a fontes naturais não modificadas, isto é, que não sofreram ação antropogênica, é uma condição inevitável da vida na Terra e não está sujeita ao controle regulatório. As principais fontes de radiação natural, que contribuem para a exposição humana são a radiação cósmica e a radiação terrestre (UNSCEAR, 2000).

Toda a população do mundo está exposta à radioatividade natural. As principais fontes de radiação natural que contribuem para a exposição do homem são:

- (a) Radiação cósmica e os radionuclídeos cosmogênicos, formados pela interação da radiação cósmica com o ar; e,
- (b) Fontes terrestre de radiação, que são os radionuclídeos de vida longa que existem na Terra desde a sua formação, bilhões de anos atrás, e que ainda não decaíram substancialmente, e seus descendentes (UNSCEAR, 2000).

A maior parte da radiação cósmica que atinge a Terra é originada fora do sistema solar e alcança a atmosfera a uma taxa razoavelmente constante. A radiação cósmica sofre interações ao longo de seu caminho na atmosfera até alcançar a superfície da Terra, produzindo o que se denomina radiação cósmica secundária. Nestas interações, perde energia e dá origem a várias partículas e aos radionuclídeos cosmogênicos.

A rigidez de uma determinada radiação é definida pela relação entre seu momento e sua carga. Cada latitude geomagnética pode ser caracterizada por uma rigidez de corte tal que partículas com rigidez inferior a este valor não podem penetrar na atmosfera nesta latitude. As latitudes equatoriais são as mais protegidas. Um exemplo da variação da exposição à radiação cósmica com a latitude é apresentado na TAB.1.1.

A exposição à radiação cósmica também varia com outros fatores, além do efeito de latitude descrito. Como o ar age como um absorvedor de raios cósmicos secundários, um efeito de altitude é então esperado. A variação dos componentes ao longo de sua trajetória afeta a taxa de dose causada pelos raios cósmicos secundários na atmosfera. Ao nível do solo, o componente de múons (FIG. 2.1) é responsável pela maior contribuição para a dose. Em altitudes de voos comerciais, nêutrons, elétrons, pósitrons, fótons e prótons são os componentes mais significativos. Em maiores altitudes, o componente de núcleos pesados também deve ser considerado (UNSCEAR, 2000).

De acordo com SHEA & SMART (2000), pessoas que vivem a 1600 metros recebem duas vezes mais exposição à radiação cósmica do que pessoas que vivem ao nível do mar. O efeito da altitude na taxa de dose é mostrado na TAB. 1.2, para diversas localidades na mesma latitude, mas para diferentes altitudes, em estudo feito na China (WANG, 2000). A TAB. 1.3 apresenta taxas de dose efetiva em cidades localizadas em altitudes significativamente superiores ao nível do mar.

**TAB. 1.1 Distribuição de taxas de dose efetiva da população, devido à radiação cósmica ao nível do mar.**

Latitude (graus)	População na faixa de latitude (%)		Taxa de dose efetiva (nSv/h)	
	Hemisfério norte	Hemisfério sul	Componente diretamente ionizante	Componente nêutron
80 - 90	0	0	32	11
70 - 80	0	0	32	11
60 - 70	0,4	0	32	10.9
50 - 60	13,7	0,5	32	10
40 - 50	15,5	0,9	32	7.8
30 - 40	20,4	13	32	5.3
20 - 30	32,7	14,9	30	4
10 - 20	11	16,7	30	3.7
0 - 10	6,3	54	30	3.6
Hemisfério norte			31	5.6
Hemisfério sul			30,3	4.0
<b>Mundo</b>			<b>30,9</b>	<b>5.5</b>

Fonte: UNSCEAR, 2000.

**TAB. 1.2 Efeito da altitude na taxa de dose absorvida devido à radiação cósmica na China.**

Local	Latitude (graus)	Altitude (m)	Taxa de dose absorvida (nGy/h)
Shanghai	32	8	29.7
Jangzu	32	50	29.7
Anhui	32	100	30.0
Hubei	32	300	31.3
Sichuan	32	1000	39.6
Tibet	32	4000	116.0

Fonte: WANG, 2002.

**TAB. 1.3 Taxa de dose efetiva devido à radiação cósmica em cidades em altitudes elevadas.**

Local	População (milhões)	Altitude (m)	Taxa de dose efetiva (mSv/a)
La Paz, Bolívia	1,0	3900	2,02
Lhasa, China	0,3	3600	1,71
Quito, Equador	11,0	2840	1,13
Mexico, Mexico	17,3	2240	0,82
Nairobi, Kenya	1,2	1660	0,58
Denver, USA	1,6	1610	0,57
Teheran, Iran	7,5	1180	0,44

Fonte: UNSCEAR, 1993.

Outro fator importante na exposição à radiação cósmica são os ciclos solares. Manchas solares aparecem quando campos magnéticos intensos emergem da superfície do Sol. Como a transferência de energia é bloqueada pelos campos magnéticos, as manchas solares são mais frias do que as áreas circunvizinhas e parecem escuras ao observador (LANTOS, 2000). A radiação cósmica galáctica é observada na Terra em proporção inversa à da fase do ciclo de manchas solares, isto é, o período de menor intensidade de radiação cósmica na superfície da Terra corresponde a um período de maior intensidade de eventos solares. Este efeito será mais discutido no próximo capítulo.

A média mundial estimada pelo UNSCEAR (2010) para a dose efetiva devido à radiação cósmica é de 0,38 mSv por ano, cerca de 16 % da dose média total.

Dentro da magnetosfera, a variação com a altitude é mais elevada, seguida pela variação com a latitude e com o ciclo solar.

Desta forma, a exposição à radiação cósmica em viagens de aviação é significativamente maior do que ao nível do solo e varia com a rota, devido ao efeito de latitude, com a altitude do voo, com o horário do voo, devido ao efeito do componente de radiação solar, e com o ano, devido ao efeito do ciclo solar no fluxo de radiação cósmica galáctica.

## 1.1 RELEVÂNCIA CIENTÍFICA

Este trabalho deve servir como uma linha de base para comparações futuras da estimativa de dose no público considerando o crescimento da aeronáutica civil no país. Como trabalho científico, é inédito no Brasil e pretende levantar o conhecimento sobre uma via de exposição do público ainda muito pouco estudada em termos mundiais, embora existam muitos estudos relativos a trabalhadores, em particular aos membros das equipes de voo. Além disso, o estudo visa obter um quadro da exposição atual da população brasileira em voos comerciais dentro do território nacional e sua contribuição para a exposição da população usuária à radioatividade natural.

A relevância de qualquer estudo sobre a exposição à radioatividade natural e seus aumentos em função de novas tecnologias, em particular neste caso, em que a exposição é considerada voluntária, deverá abrir perspectivas para discussões futuras sobre o conceito de risco, sua avaliação e sua aceitação pública, em um viés da Bioética de grande relevância para o estabelecimento de diretrizes de radioproteção.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estimar a contribuição da radiação cósmica em voos comerciais com vistas à exposição da população brasileira usuária, estimar

as doses de viajantes frequentes e estimar doses médias per capita para as diferentes regiões do Brasil.

Especificamente, o trabalho envolve as seguintes etapas:

- a) Levantamento dos voos comerciais circulando dentro do território nacional através de companhias oficiais registradas;
- b) Estimativa das doses médias dos voos utilizando o programa CARI-6;
- c) Estimativa das variabilidades devido a horário, estação do ano e ano considerando um período de ciclo solar;
- d) Estimativa das doses médias individuais por rota;
- e) Estimativa de doses coletivas por rota;
- f) Estimativa do acréscimo à exposição natural devido à voos comerciais de passageiros no Brasil;
- g) Estimativa de dose de passageiros frequentes para as rotas mais comuns.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Com a finalidade de expor as idéias aqui apresentadas de maneira clara e objetiva, este trabalho está dividido em cinco capítulos e um anexo.

No capítulo 2 é apresentado o levantamento bibliográfico com objetivo de aprofundar conhecimentos sobre a radiação cósmica.

No capítulo 3 é mostrada a metodologia que foi usada e o levantamento dos dados coletados.

No capítulo 4 são apresentados todos os resultados obtidos, apresentando o Banco de dados, os cálculos de dose e sua análise de incerteza.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão do estudo realizado.

O ANEXO 1 apresenta os resumos dos trabalhos apresentados em congressos durante o desenvolvimento desta dissertação. Todos os congressos incluem a publicação de resumos e de trabalhos completos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 RADIAÇÃO CÓSMICA

O estudo da radiação cósmica originou-se no final do século XIX e início do XX, por meio de experimentos desenvolvidos com condutividade dos gases. Entretanto, foi em 1912 que Victor Hess conseguiu detectar pela primeira vez uma radiação de grande poder de penetração por meio de voos realizados com balão atmosférico, constatando a existência da radiação cósmica (SCHLAEPFER, 2003; AUGUSTO, 2006; PUTZE, 2006). Em 1950, as principais características da composição de raios cósmicos primários já eram conhecidas.

A radiação cósmica é constituída por radiação cósmica galáctica e radiação cósmica solar. A Radiação Cósmica Galáctica - RCG surge a partir de fontes externas ao sistema solar, no espaço interestelar. Os raios cósmicos galácticos incidentes na atmosfera são compostos por um componente nucleônico, que constitui cerca de 98% do total, e elétrons como restante. O componente nucleônico é composto principalmente por prótons, que correspondem a cerca de 85,5% do fluxo, partículas alfa, que correspondem aproximadamente a 12%, e o restante, aproximadamente 1%, sendo constituído de núcleos mais pesados. Os raios cósmicos galácticos apresentam um espectro de energia que varia de  $10^8$  até acima de  $10^{20}$  eV. A Radiação Cósmica Solar - RCS é produto da atividade solar. (EURADOS GT5, 2004; GREEN et al., 2005; ZHOU et al., 2006; VUKOVIC et al., 2006a; 2008b).

A radiação cósmica é uma radiação ionizante e costuma ser classificada como radiação cósmica primária e radiação cósmica secundária (FIG. 2.1). A radiação cósmica primária (prótons, elétrons e os íons mais pesados) tem origem fora da Terra devido à aceleração de fontes astrofísicas; a radiação cósmica secundária se divide em três categorias: (a) núcleos (prótons e nêutrons), (b) eletromagnéticos (elétrons e fótons), e (c) múons. Os raios cósmicos secundários são formados quando partículas de alta energia incidentes (primária) interagem com a atmosfera da Terra, gerando um conjunto complexo de partículas secundárias.

A importância relativa dos vários componentes varia com a profundidade na atmosfera, sendo que a importância relativa de prótons e nêutrons é maior em altas

altitudes e os múons são mais importantes ao nível do mar. As taxas de dose aumentam acentuadamente em altitudes mais elevadas (SIINGH, 2008; THIERFELDT, 2009; UNSCEAR, 2008).

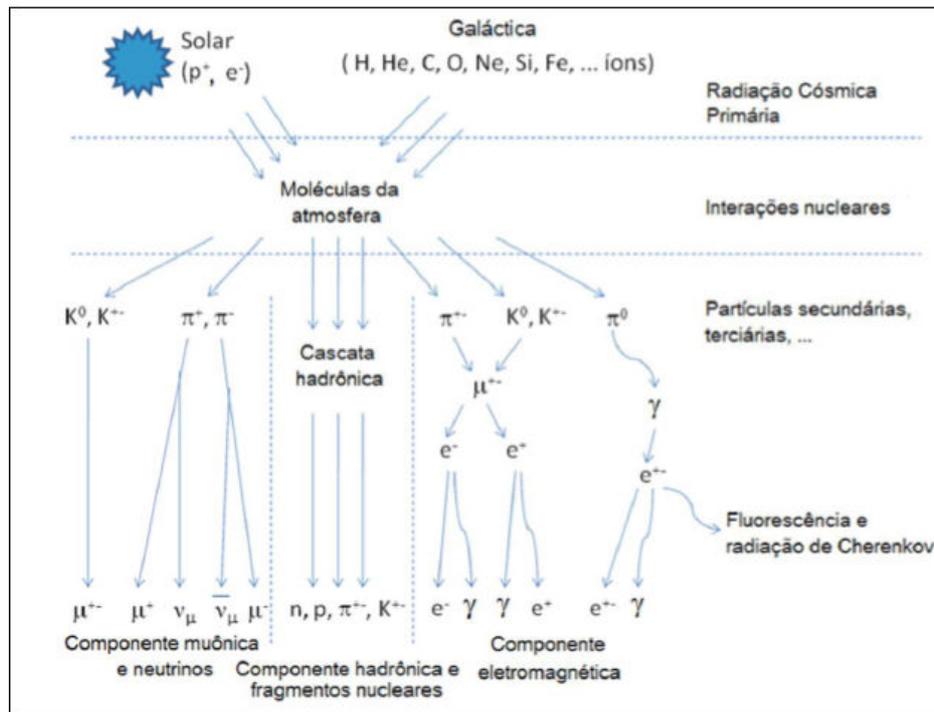


FIG. 2.1 Representação das interações das partículas da radiação cósmica primária com a atmosfera, originando raios cósmicos secundários. (FONTE: FEDERICO, 2011).

De acordo com a FIG. 2.1, as interações da radiação cósmica galáctica primária na atmosfera podem produzir três principais componentes do campo de radiação, conforme já citado anteriormente. Todos são radiações secundárias que ao interagirem com o campo magnético podendo gerar mais núcleos, produzindo uma cascata nucleônica na atmosfera. Como resultado de várias interações, os picos de distribuição de energia de nêutrons variam de 50 e 500 MeV. As contribuições dos principais componentes da radiação cósmica para a taxa de dose, em função da altitude na atmosfera, esta ilustrada na FIG. 2.2 e as contribuições relativas dos diversos componentes são importantes para a avaliação da exposição de raios cósmicos. Píons gerados nas interações nucleares são fontes principais de outros componentes do campo da radiação cósmica na atmosfera. A carga neutra dos píons decai em fótons de alta energia; estes decaem resultando em uma cascata de pósitrons / elétrons. O decaimento dos píons de baixa energia é o

principal responsável pela produção de múons, que são partículas carregadas, onde a maioria é produzida a uma altitude de aproximadamente 15 km e no seu trajeto ao atingir o solo perde cerca de 2 GeV (GAISSER & STANEV, 2007; GUIMARÃES, 2008; MARES & YASUDA, 2010; UNSCEAR, 2008). As características das partículas apresentadas na FIG. 2.2 estão descritos na TAB 2.1.

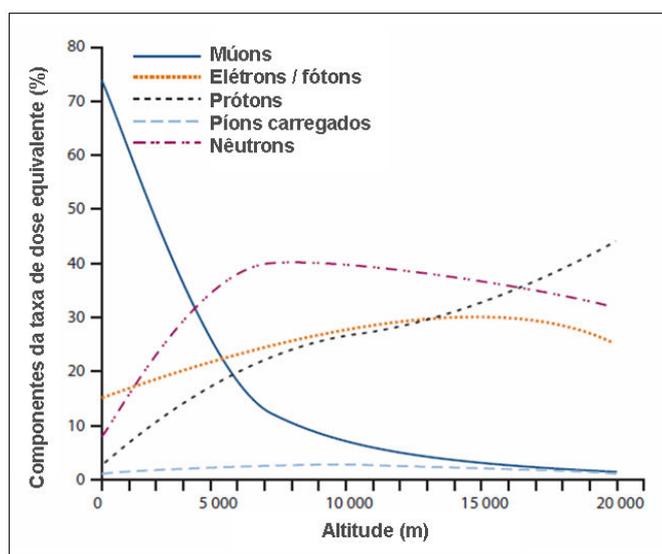


FIG. 2.2: Componentes de taxa equivalente de dose devido à radiação cósmica na atmosfera.  
(FONTE: Modificado UNSCEAR, 2008).

TAB. 2.1 Propriedades de algumas partículas de radiação cósmica presentes na atmosfera da Terra.

Nome		Massa (MeV)	Vida média (s)	Principal modo de decaimento
Múon	$\mu^\pm$	105,6	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$e^\pm + \nu_e + \nu_\mu$
Elétron	$e^\pm$	0,511	Estável	Estável
Fóton	$\gamma$	0	Estável	Estável
Próton	$p$	938,2	Estável	Estável
Píon	$\pi^\pm$	139,6	$2,55 \cdot 10^{-8}$	$\mu + \nu_\mu$
	$\pi^0$	134,9	$1,78 \cdot 10^{-10}$	$\gamma + \gamma$
Nêutron	$n$	939,5	$1,01 \cdot 10^3$	$p + e^- + \nu_e$

Fonte: UNSCEAR, 1993.

O campo magnético da Terra serve de blindagem, que funciona de duas maneiras: (a) o campo magnético chamado de magnetosfera redireciona partículas

de alta energia, para fora do campo magnético; (b) a densidade da atmosfera, uma vez que parte da radiação que passa pela magnetosfera é absorvida pelos níveis inferiores da atmosfera.

A magnetosfera possui dois cinturões chamados de Cinturões de Van Allen (FIG. 2.3), que são formados pela captura de prótons e elétrons pelo intenso campo magnético terrestre. O cinturão de Van Allen interno fica a aproximadamente 3.000 km da superfície da Terra e corresponde as camadas de partículas carregadas, prótons e elétrons; o cinturão externo, que fica 22.000 km da superfície da Terra, possui outra camada de partículas carregadas, predominantemente formada por elétrons. A energia dessas partículas varia consideravelmente, dependendo da emissão dos fluxos de plasma do Sol, chamados de tempestades magnéticas (BRUM, 2005). No cinturão interno ocorre uma anomalia conhecida com Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS, localizada a cerca de 800 km de Porto Alegre, Brasil. A AMAS é uma região onde o efeito de proteção da magnetosfera perde parte de sua eficiência, onde o cinturão de Van Allen fica bem próximo à superfície da Terra (ARCANJO & FERREIRA, 2009; UNSCEAR, 2008).

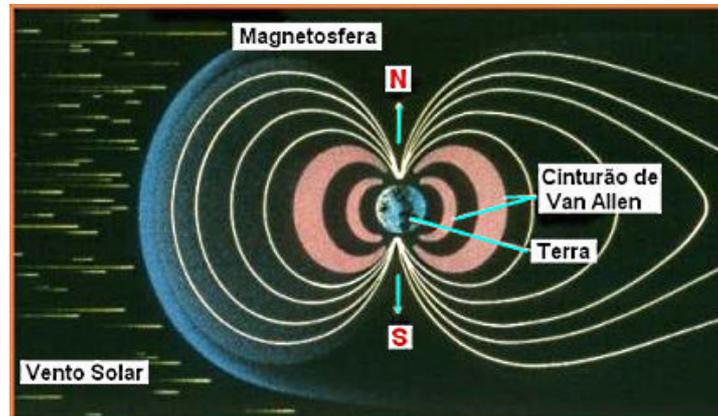


FIG. 2.3: Cinturão de de Van Allen.

Além do campo magnético, a vida está protegida da exposição à radiação cósmica por uma camada de ar de aproximadamente  $10.000 \text{ kg/m}^2$ . Cálculos baseados nesta informação apontam para uma proteção que leva, a radiação cósmica em nível do mar a contribuir com cerca de 10% da taxa de dose total de radiação natural total à qual os seres humanos têm sido expostos. No entanto, em grandes altitudes na atmosfera ou no espaço, os raios cósmicos constituem os

campos dominantes de exposição. A contribuição da radiação solar remanescente por ser menos energética, pouco contribui para a dose ao nível do mar. Existe, entretanto, a exposição à radiação solar e o efeito do ciclo de eventos solares de maior intensidade que alteram a exposição aos RCGs. Os eventos solares, que variam com o ciclo solar, são mais imprevisíveis e momentâneos (UNSCEAR, 2008).

O nível de radiação cósmica na atmosfera da Terra depende basicamente de três fatores, que são: (a) a altitude, (b) latitude, e (c) eventos de partículas solares (ciclo solar).

### 2.1.1 EFEITOS DA ALTITUDE

A camada atmosférica da Terra fornece proteção significativa em relação à exposição à radiação cósmica. Fótons e prótons são os componentes mais importantes em altitudes de voos comerciais. Em altitudes mais elevadas, onde o componente de núcleos pesados deve ser considerada, o efeito de proteção fornecido pela camada de ar diminui, levando a níveis mais altos de exposição à radiação cósmica. Um exemplo da exposição à radiação em altitudes são voos de aeronaves convencionais, que viajam a uma altitude de 30.000 - 40.000 pés (9-12 km). Essa exposição é 100 vezes maior do que na superfície da Terra ao nível do mar (USOSKIN et. al. 2012; EURADOS GT5, 2004).

### 2.1.2 EFEITOS LATITUDE

O campo magnético da Terra desvia muitas partículas de radiação cósmica que poderiam atingir o nível do solo, apenas partículas de altas energias podem atravessar o campo magnético em baixas latitudes geomagnéticas. Essa blindagem do campo magnético é mais eficaz no Equador e diminui em latitudes mais altas, como os pólos geomagnéticos. Perto da Terra, o campo geomagnético age como um separador de partículas cósmicas incidentes, de acordo com a sua energia, na realidade, de acordo com o seu momento (rigidez).

A rigidez geomagnética é a capacidade de uma partícula cósmica conseguir atravessar ou não pelo campo geomagnético (EURADOS GT5, 2004; MENDONÇA, 2011a e 2011b; UNSCEAR, 2008).

### 2.1.3 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação cósmica solar origina-se dos raios solares. As partículas de radiação cósmica solar são compostas principalmente de prótons, aproximadamente 99%, com energia variando de 100 MeV até alguns GeV. Estas partículas podem produzir doses significativas em grandes altitudes (SILVA, 2008; UNSCEAR, 2008). Ocasionalmente, ocorrem explosões com emissão de partículas carregadas no Sol, que podem levar a um aumento brusco dos níveis de radiação na atmosfera e na Terra, não sendo eventos previsíveis; estes eventos são de curta duração, geralmente de poucas horas, e os níveis de radiação causados por um evento de partículas solares não são uniformes na Terra. Estes eventos podem alterar o campo magnético da Terra, produzindo um impacto insignificante na exposição a longo prazo da população (EURADOS GT5, 2004; UNSCEAR, 2008).

A atividade do Sol varia de forma previsível, com um ciclo de aproximadamente 11 anos. A variação periódica da atividade solar produz uma variação semelhante do vento solar, que é um plasma altamente ionizado com um campo magnético associado cuja intensidade variável modula a intensidade da radiação cósmica galáctica, em momentos de máxima atividade solar (BENNETT et al., 2012; MEIER, 2010). O ciclo solar é apresentado na FIG. 2.4, a partir dos valores médios mensais de pontos (manchas) solares no período de 1750 a 2008 (NASA, 2010).

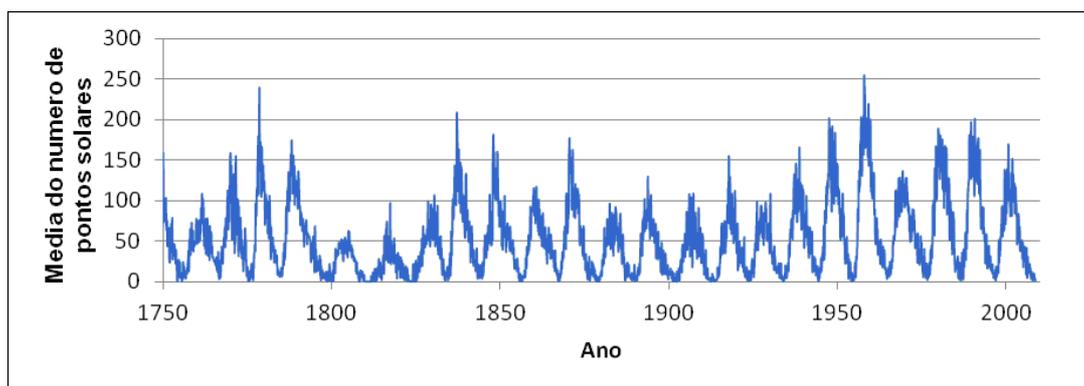


FIG. 2.4 Variação da atividade solar ao longo do tempo.  
(FONTE: Modificado NASA, 2010).

Quanto maior a atividade solar, menores são os níveis de radiação cósmica galáctica, devido ao campo magnético resultante do Sol desviar a radiação da Terra. Como exemplo, o fluxo de nêutrons ao nível do solo, o que é causado principalmente pela radiação cósmica, é mostrado como uma função do tempo e tem ligação com a atividade solar, indicado pelo número de manchas solares. Um exemplo do efeito do ciclo solar na dose devido à radiação cósmica total (solar + galáctica) relacionada a um voo de ida e volta entre Frankfurt, na Alemanha, e New York, nos Estados Unidos é mostrado na FIG. 2.5.

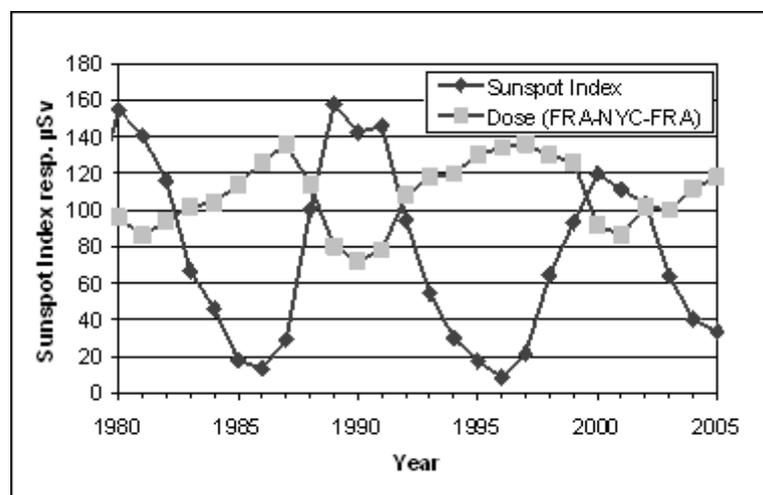


FIG. 2.5 Relação da dose devido à radiação cósmica em relação a um voo de ida e volta entre Frankfurt e Nova York, no período de 1980 a 2005 (FONTE: UNSCEAR, 2008)

## 2.2 RADIAÇÃO CÓSMICA EM VOOS

O campo de radiação cósmicos em altitudes de voos é composto de raios primários que são RCG e RCS, e raios secundários produzidas na atmosfera da Terra. A exposição à radiação cósmica em altitudes elevadas é muito complexa e significativamente diferente da vivida pelos trabalhadores da indústria nuclear. A intensidade da radiação varia com as rotas, latitude, altitude de voo e atividade solar, conforme apresentado nos itens 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3.

Ao nível do mar, o componente dominante da dose equivalente é o múon. A taxa de dose em altitudes de voo (9 a 12 km) é aproximadamente 5 μSv/h, sendo

40% de nêutrons, 30% de fótons e elétrons, 25% de prótons e 5% múons. A dose de radiação cósmica torna-se maior com o aumento da altitude. (POJE et al., 2008; ROMANO, 1997; THIERFELDT et al., 2009).

Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) nº 60, recomendou em 1991, que a exposição de tripulantes à radiação cósmica em voo devem ser considerados como parte da exposição ocupacional às radiações ionizantes, sendo igual ou superior à de outros grupos de trabalhadores expostos na medicina e tecnologia. Mais especificamente, a energia das partículas e a intensidade de partículas primárias cósmica são maiores a bordo das aeronaves do que ao nível do mar. (BAGSHAW, 2008; BENNETT et al., 2012; KENDALL, 2005; MARES & YASUDA, 2010; O'SULLIVAN et al., 1999; PETROV, 2004).

Na Europa, o Conselho da União Européia aprovou um regulamento que estabelece diretrizes básicas de segurança, para a proteção da saúde dos trabalhadores e da população em geral, contra os efeitos da radiação ionizante. Esta diretriz não cita qualquer aspecto de radioproteção a ser aplicado a membros do público, passageiros dos voos. Em relação à exposição ocupacional, esta diretriz estabelece que a dose para a tripulação deva ser controlada anualmente pelo empregador e não deve exceder 1 mSv/a (EURATOM, 1996).

Nos Estados Unidos, a FAA (*Federal Aviation Administration*) recomendou em 1994, que a tripulação aérea deva ser informada sobre a exposição à radiação e os riscos de saúde associados. No Japão, o governo solicitou às empresas aéreas que controlassem as doses anuais dos tripulante e que deve ser mantido a um nível abaixo de 5 mSv/a (BAGSHAW, 2008; MARES & YASUDA, 2010).

A exposição ocupacional à radiação cósmica vem sendo estudada exaustivamente em relação a equipes de bordo de aeronaves comerciais. Apesar de não ter sido possível caracterizar que esta exposição seja um problema ocupacional, as doses podem ser razoáveis em alguns voos, levando a doses individuais variando na faixa de 2 a 5 mSv/a para membros da tripulação, dependendo da rota e da frequência de viagens efetuada por estes trabalhadores (BOTTOLLIER-DEPOIS et al., 2000; COPELAND et al., 2008; FENG et al., 2002; FRIEDBERG et al., 2000; OKSANEN, 1998; PETROV, 2004; WATERS et al., 2000).

Apesar de, para o público em geral, esta exposição não estar sujeita à regulamentação, por ser uma atividade voluntária, os voos comerciais representam

um aumento tecnológico à exposição das pessoas à radiação natural. Este componente da exposição do público é, no entanto, muito pouco estudado e poucos levantamentos são encontrados na literatura. Não se tem idéia da contribuição para a dose coletiva ou da dose dos viajantes frequentes, que podem viajar até mesmo mais do que as equipes de bordo.

Um levantamento genérico foi efetuado apenas para a Inglaterra, cujos dados dificilmente podem ser extrapolados para outros países devido às peculiaridades daquele país, como por exemplo, a localização em uma ilha, e o alto poder aquisitivo da população, facilidades econômicas da União Européia, entre outros. O trabalho observou um aumento na exposição à radiação devido à voos comerciais de cerca de 50 % em média para a população da Inglaterra, entre os anos de 1999 e 2002, sendo que a dose total em 2002, devido a esta fonte, representa cerca de 10% da exposição externa total média no país (WATSON et al., 2005).

### 2.3 PROGRAMA COMPUTACIONAL CARI-6

O código CARI-6, desenvolvido pelo *US Federal Aviation Administration Civil Aerospace Medical Institute*, a qual pertence ao *Federal Aviation Administration* (FAA) dos Estados Unidos, calcula a dose efetiva de radiação cósmica galáctica recebida por um indivíduo (com base em um *phantom* antropomórfico) em uma aeronave voando a rota mais curta entre quaisquer dois aeroportos no mundo. O programa leva em conta os efeitos da atividade solar e as mudanças de altitude e localização geográfica durante o curso de um voo, conforme derivados do perfil de voo inseridos pelo usuário. A radiação de eventos de partículas solares individuais não é levada em conta pelo programa, embora este considere os efeitos do ciclo solar na exposição à radiação cósmica.

Com base na data (mês e ano) do voo, bancos de dados adequados são usados para explicar os efeitos das mudanças no campo magnético da Terra e a atividade solar (potenciais heliocêntricos) sobre os níveis de radiação galáctica na atmosfera. O programa também calcula a taxa de dose efetiva de radiação galáctica, em qualquer local na atmosfera em altitudes de até 60.000 pés (18.288 metros) (FAA, 2011). O programa considera que desvios da rota mais curta de até 200

milhas (~ 322 km) têm muito pouco efeito sobre a dose de voo. Assim, os fatores que afetam a taxa de dose utilizada pelo CARI-6 incluem:

- a) Mudanças no campo magnético da Terra.
- b) Mudanças na atividade solar.
- c) Altitude podendo variar até 60.000 pés.
- d) Coordenadas geográficas (latitude e longitude).

O código CARI-6 é baseado no sistema operacional DOS (FIG. 2.6), sendo executado somente no sistema Windows. O CARI-6 requer o MS-DOS versão 3.2 ou superior e cerca de 4,5 MB de espaço em disco rígido para ser executado. Além da versão em DOS, a FAA disponibiliza uma versão online (FIG. 2.7) mais simples de ser utilizada.

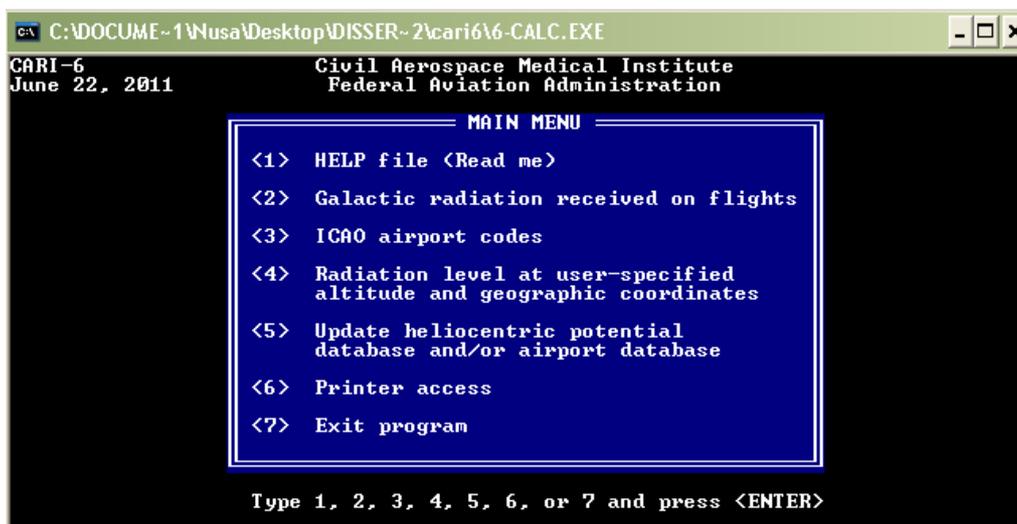


FIG. 2.6 CARI-6 versão DOS.

FAA Civil Aeromedical Institute x  
 jag.camii.jccbi.gov/cariprofile.asp

**FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION  
 OFFICE OF AEROSPACE MEDICINE  
 CIVIL AEROSPACE MEDICAL INSTITUTE**

These forms require a javascript enabled browser. Left Click on HELP For Instructions [HELP](#)

**Galactic Radiation Received In Flight**

Enter Flight Data		
Date of Flight	--	01/1995 = January 1995 00/1995 = Average for 1995
Origin Code		Enter ICAO Code or <a href="#">Look Up Origin Code</a>
Destination Code		Enter ICAO Code or <a href="#">Look Up Destination Code</a>
Number of en route altitudes		
Minutes to 1st en route altitude		
	<input type="button" value="Continue"/>	On the next screen you will be asked for en route altitudes, flight times and time spent in final descent..

FIG. 2.7 CARI-6 versão *online*.

As duas versões do código requerem que o usuário forneça a data do voo, os aeroportos de origem e destino (utilizando o código ICAO - *International Civil Aviation Organization*), os patamares de altitude (sendo permitido até 15 patamares de altitudes, utilizando a unidade de medida em pés), a duração do voo em cada patamar de altitude e o tempo de subida e de descida da aeronave na decolagem e pouso, respectivamente. Dados de aeroportos que não estejam no banco de dados do programa podem ser acrescentados pelo usuário (versão DOS), tornando o programa facilmente adaptável a diferentes localidades. Na versão *online*, existe um banco de dados de aeroportos fixas que inclui os principais aeroportos de cada país, mas, para aeroportos de menor porte, o usuário tem que enviar por *e-mail* os dados de localização do aeroporto para o administrador, para que o mesmo possa incluir este aeroporto no banco de dados do código.

O código CARI-6 vem sendo muito utilizado em trabalhos científicos para a análise da exposição à radiação cósmica da tripulação, o mesmo foi validado por Federico (2011), Spurn (2002), Fujitaka (2000), Sohrabi e Esmaili (2002) e Lin (1996). Embora originalmente desenvolvido para quantificar a exposição à radiação de tripulações de voo, o código de computador CARI-6 é de domínio público e efetua

o cálculo da dose prevista para um determinado voo, em função do tempo de voo, considerando as variações devido à altitude e latitude, como também devido ao ciclo solar. É interessante notar como os resultados previstos apresentam boa consistência com dados de medidas disponíveis na literatura, conforme a TAB. 2.2 (SOHRABI AND ESMAILI, 2002; LIN et al., 1996).

**TAB. 2.2: Valores medidos e calculados pelo código CARI-6.**

<b>Referência</b>	<b>Valor Reportado (nGy/h)</b>	<b>CARI-6 (nGy/h)</b>
Sohrabi and Esmaili, 2002	32	33
Lin et al., 1996	27	28

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos a metodologia e os sistemas utilizados no desenvolvimento deste trabalho, como o banco de dados gerados com os voos domésticos, o programa computacional utilizado para calcular as doses devido à radiação cósmica em voos domésticos e a descrição dos programas utilizados para fazer o tratamento estatístico.

A metodologia adotada para o presente trabalho consta das seguintes etapas:

- a) Levantamento de dados de voos efetuados junto a empresas aéreas, a Infraero e revistas especializadas;
- b) Organização dos dados em planilha Excel;
- c) As simulações para obter as doses foram efetuadas utilizando o modelo CARI-6, desenvolvido pelo FAA (FAA, 2011);
- d) Avaliação das incertezas decorrentes de diferentes tempos de voo, diferentes estações do ano e diferentes anos, dentro de uma mesma rota, para as principais rotas de voos domésticos;
- e) Análise estatística e interpretação dos resultados.

#### 3.1 BANCO DE DADOS

O banco de dados que inclui todos os voos de rotina comercial no Brasil, foram implementados em planilhas do Excel, com base nos dados da revista especializada Pan Rotas de Bolso do mês de Novembro de 2011 (PAN ROTAS, 2011). Na revista constam as seguintes informações:

- Itinerários dos voos (aeroporto de origem e destino);
- Código IATA (*International Air Transport Association*);
- Frequência semanal do voo;
- Horários de embarque e desembarque dos voos domésticos e internacionais;
- Diferença do horário em relação ao horário de Brasília;
- A empresa aérea, indicada em sigla, composta por duas letras;
- Equipamento (tipo de aeronave que irá realizar o voo);

- O número do voo (código);
- Escala;
- Classe.

Na confecção do banco de dados, de forma a evitar duplicação de voos, foram considerados apenas os voos diretos (sem escalas) uma vez que as escalas aparecem também na revista como voos diretos. A informação sobre a classe do voo foi considerado irrelevante para o estudo e não foi, portanto, utilizada.

As informações do banco de dados foram utilizadas para estimar doses individuais, em  $\mu\text{Sv}$  para cada voo, e doses coletivas em homem Sv/a, baseado na capacidade de passageiros de cada aeronave e a frequência anual de cada voo. A informação sobre tempo de subida e de pouso e altitude de voo em rota foi obtida a partir de consulta com especialistas e dados oficiais das companhias aéreas.

A qualidade e confiabilidade dos dados incluídos no banco de dados foram verificadas por seleção de voos aleatórios e verificação de sua disponibilidade junto às companhias aéreas. Cerca de 5% dos voos do banco de dados foram verificados de forma individual por este procedimento, conforme descrito no item 3.1.1.

### 3.1.1 VALIDAÇÃO

Para executar a validação dos dados da revista "Pan Rotas" (Pan Rotas, 2011), 5% dos voos listados no banco de dados foram selecionados aleatoriamente e pesquisas foram feitas em sites das companhias aéreas, utilizando as siglas das empresas aéreas indicadas na revista e no banco de dados. Concluiu-se que 95% dos voos selecionados foram confirmadas nos sites das companhias aéreas e os outros 5% dos voos não foram encontrados porque a companhia foi fechada em 2012. Todos os voos desta companhia fechada foram verificados na empresa que absorveu a maioria dos voos da companhia aérea que fechou e aqueles que não foram confirmados foram retirados do banco de dados. O banco de dados final, então, inclui 3.872 siglas de voos domésticos, com mais de 1.000.000 de voos individuais, isto é, de voos diretos entre 2 aeroportos, por ano no Brasil.

### 3.1.2 CÓDIGO IATA E ICAO

O Código IATA é utilizado pela revista Pan Rotas para indicar os aeroportos. Este é um código composto por três letras que indica os aeroportos em todo mundo e é definido pela Associação Internacional de Transportes Aéreos. Um exemplo da utilização desse código é o seu uso rotineiro na bagagem despachada no *check-in* dos voos, para identificação dos aeroportos de origem e de destino (IATA, 2012).

Neste trabalho, o código IATA foi necessário para identificação do código ICAO (*International Civil Aviation Organization*). O código ICAO é um código composto por quatro letras, também utilizado para indicar os aeroportos em todo o mundo e é definido pela Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO, 2012). A importância neste trabalho do código ICAO foi à necessidade deste código para realizar os cálculos de doses, pois o programa CARI-6 utiliza este código para a identificação dos aeroportos.

### 3.1.3 FREQUÊNCIA SEMANAL

A frequência semanal indica quais os dias da semana que ocorre o voo. Esta informação foi importante para calcular a quantidade anual de cada um dos voos, definido nos bancos de dados e pelas companhias aéreas por seu código específico. A revista Pan Rotas utiliza números para identificar os dias da semana atendidos por um determinado voo, onde número 1 corresponde a Domingo, 2 corresponde a Segunda-feira, e assim sucessivamente.

### 3.1.4 CORREÇÃO DO HORÁRIO DE VERÃO

Na montagem do banco de dados, houve a preocupação com a diferença de horário decorrente do horário de verão. A revista Pan Rotas, da qual foram extraídos os dados, é do mês de Novembro de 2011, e a mesma indica a diferença de 1 hora (em relação ao horário de Brasília, capital do Brasil) para os estados que não estão no horário de verão. O horário de verão do ano de 2011 ocorreu nos estados das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e também na Bahia (G1, 2011).

Os Estados Amazonas, Acre, Roraima e Rondônia, na região Norte, possuem uma diferença de menos 1 hora do Brasília em períodos normais e, no horário de verão, esta diferença é de menos 2 horas.

A diferença do fuso horário foi importante para calcular o tempo total de voo, pois os horários de voos indicados na revista estão de acordo com o horário local do destino, como exemplo: um voo que sai às 15h 15min de Fortaleza, CE e chega às 19h 40min no Rio de Janeiro, RJ, sem a correção do fuso horário, indicaria um tempo total de voo de 4h 25min, sendo que o Ceará não está no horário de verão e o Rio de Janeiro sim; então, como no horário de verão há um acréscimo de 1 hora do horário normal no aeroporto de destino, o tempo total correto do voo é de 3h 25min.

### 3.1.5 DADOS DE ALTITUDE E TEMPO DE SUBIDA DE DESCIDA DO VOO

Os dados incluídos no banco de dados como altitude e o tempo de subida e descida dos voos foram obtidos pelo DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo - informação pessoal), que é uma Organização Militar da Força Aérea Brasileira (FAB) responsável pelo controle estratégico do espaço aéreo brasileiro. A altitude de voo varia de acordo com o itinerário e tipo de aeronave. Para aviões de grande porte (equipamento com mais de 80 de passageiros), a altitude de voo varia entre 30.000 a 38.000 pés (9.140 a 11.600 metros). O valor utilizado nas simulações foi 34.000 pés (10.363 metros). Os tempos de subida e de descida informados foram de 12 a 18 minutos, sendo 15 minutos o valor utilizado nas simulações.

Para aviões de pequeno porte (equipamento com menos de 80 passageiros) e / ou tempos de voo muito curtos (menos de 45 minutos), a informação utilizada nas simulações foi obtida junto ao Coordenador de Tráfego Aéreo do Aeroporto de Jacarepaguá, no Rio de Janeiro, (informações pessoais). De acordo com esta fonte, a altitude de cruzeiro média para aviões de pequeno porte é de 16.000 pés (aproximadamente 5.000 metros) e o tempo de subida da decolagem até a altitude de cruzeiro e o tempo de descida para pouso foram considerados como sendo 8 minutos cada um.

### 3.1.6 NÚMERO DE PASSAGEIROS

O número de passageiros foi determinado a partir do tipo de aeronave utilizada em cada voo. A revista Pan Rota, especifica o equipamento que é utilizado para realizar cada voo. Com o tipo de equipamento é possível saber o número de passageiros através de sites das companhias aéreas e dos fabricantes das aeronaves (AIRBUS, 2012; ATR, 2012; BOEING, 2012; EMBRAER, 2012; FOKKER, 2012; CESSNA, 2012; LET, 2012). Na TAB. 3.1 estão apresentados todos os equipamentos que constam no banco de dados e o número de passageiros previsto para estas aeronaves.

**TAB. 3.1 Número de passageiros.**

<b>Equipamento</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Nº Passageiros</b>
318	Airbus	A318	120
319	Airbus	A319	138
320	Airbus	A320	162
321	Airbus	A321	220
330	Airbus	A330	223
A42	ATR	42-300	48
A42	ATR	42-500	48
A72	ATR	72-200	68
A72	ATR	72-500	68
733	Boeing	737-300	145
73G	Boeing	737-700	144
738	Boeing	737-800	184
763	Boeing	767-300ER	230
777	Boeing	777	362
E75	EMBRAER	E175	86
E90	EMBRAER	E190	105
E95	EMBRAER	E195	118
EM2	EMBRAER	EM2	30
ER4	EMBRAER	ERJ145	50
100	Fokker	100	100
CNA	Cessna	900	10
L4T	LET	410	19

## 3.2 CÁLCULO DA DOSE

O cálculo de dose recebida durante o voo foi efetuado para cada voo, conforme definido por seu código de voo, de forma individual, para cada rota descrita, utilizando o programa CARI-6 (CARI-6, 2012; FAA, 2011). Considerando-se que cada voo de ida corresponde um voo de volta entre dois aeroportos, os cálculos foram efetuados para apenas um sentido, tendo então sido efetuadas 1.936 simulações com o programa CARI-6.

Os resultados de dose coletiva foram estimados para cada rota, considerando as doses individuais para cada rota, a frequência de voos e as características da aeronave utilizada (capacidade da aeronave). Neste cálculo foram considerados os voos de ida e de volta entre cada dois pontos, isto é, foram considerados todos os 3.872 diferentes voos registrados.

A equação utilizada para obter a dose coletiva foi:

$$C_R = D_R \times 10^{-6} \times f_R \times N_{aeronave R} \quad (3.1)$$

Onde:

$C_R$  = Dose Coletiva (homem-Sv) da rota R;

$D_R$  = Dose individual de um passageiro em um determinado voo ( $\mu$ Sv);

$f_R$  = Frequência anual do voo;

$N_{aeronave R}$  = Número de passageiros na aeronave que atende á rota R.

Conforme citado no Capítulo 2, item 2.3, o código CARI-6 possui duas versões, a versão *online* e a versão em MS-DOS. As duas versões do programa foram utilizadas. A versão *online*, por ser de uso mais fácil, foi utilizada inicialmente e observou-se que o programa só contava os dados dos aeroportos internacionais. A versão em DOS também só constava os aeroportos internacionais, porém esta versão permite ao usuário incluir novos aeroportos, onde é solicitado o nome do aeroporto, o Estado e País, o código ICAO e as coordenadas geográficas do aeroporto a ser cadastrado.

As coordenadas geográficas dos aeroportos não cadastrados no programa CARI-6 foram extraídas dos sites como Infraero, ANAC - Agência Nacional de

Aviação Civil e do aplicativo *Google Earth* (ANAC, 2012; INFRAERO, 2012; GOOGLE EARTH, 2012). Com o código IATA foi possível identificar o código ICAO, para registro do aeroporto não cadastrado, e foram utilizados os dados dos sites e do aplicativo para encontrar a Latitude e Longitude Geográfica, e a altitude dos aeroportos, também requerida como dado de entrada da versão DOS do programa CARI-6.

### 3.3 ANÁLISE DE INCERTEZAS

A fim de simplificar a análise, devido ao grande número de voos, foram investigadas algumas fontes de variabilidade incluídas nos cálculos. Para avaliar a incerteza devido à variabilidade anual no fluxo de raios cósmicos, foi selecionado um voo do Rio de Janeiro, RJ, a Porto Alegre, RS. A distância entre os dois aeroportos é de cerca de 2.000 km e o tempo de voo é de aproximadamente 2 horas. Este voo foi simulado em meses diferentes em 2011 e nos anos de 1995 a 2011. Como a altitude de voo varia de acordo com o itinerário, esta variabilidade foi avaliada para voos de altitude média 30.000 – 38.000 pés, com base nas informações de altitude média de voo de 34.000 pés. Os resultados apresentados correspondem à dose total de voo.

Para avaliar as diferenças de latitude no Brasil, foram simuladas as doses de voos entre Rio de Janeiro, RJ para diferentes locais no Brasil. Os aeroportos estão mostrados na FIG. 3.1 e as suas localizações e características estão na TAB. 3.2. Os resultados para avaliar o efeito latitude são apresentados em  $\mu\text{Sv/h}$  a uma altitude de voo padrão de 34.000 pés.



FIG. 3.1 . Aeroportos incluídos nas simulações.  
(FONTE: ROCHEDO, 2012)

TAB. 3.2 Localização dos aeroportos.

Cidade	Cód. IATA	Cód. ICAO	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Rio de Janeiro	GIG	SBGL	22° 48' 36" S	43° 15' 02" W	9
Porto Alegre	POA	SBPA	29° 59' 38" S	51° 10' 16" W	3
São Paulo	GRU	SBGR	23° 26' 08" S	46° 28' 23" W	750
Brasília	BSB	SBBR	15° 52' 09" S	47° 55' 15" W	1060
Salvador	SSA	SBSV	12° 54' 31" S	38° 19' 21" W	20
Manaus	MAO	SBEG	03° 02' 28" S	60° 03' 02" W	80

A partir dos resultados obtidos nesta análise e dos cálculos de dose para diferentes voos entre as mesmas cidades, foi efetuada uma análise integrada de incerteza para os voos diretos entre as cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília, utilizando os programas WinGraf e Crystal Ball®.

### 3.3.1 WINGRAF

O WinGraf é um programa não comercial, desenvolvido no IRD/CNEN para aplicação em trabalhos na área ambiental (CONTI, 2005). O principal objetivo do programa é a verificação de ajustes estatísticos, principalmente para escolha de distribuições adequadas aos dados experimentais. Tem sido muito usado em ajustes de curvas log-normais, comuns de serem encontradas nos ajustes de dados ambientais (LAURIA et al, 2012). O programa permite visualizar a curva, seus ajustes de distribuição e coeficientes de correlação, bem como efetuar subdivisões dos conjuntos de dados para descrever os parâmetros estatísticos básicos do conjunto total e suas subdivisões, o que permite efetuar testes estatísticos de ajustes de distribuição.

### 3.3.2 CRYSTAL BALL<sup>®</sup>

O Crystal Ball<sup>®</sup> foi desenvolvido para efetuar previsões a partir da variabilidade dos parâmetros de entrada de um modelo determinístico. É fácil a manipulação do software e uso, ao contrário de outros programas estatísticos não é necessário aprender formatos estranhos ou linguagens de modelagem especiais.

O programa utiliza simulação de Monte Carlo, no qual prevê toda a gama de resultados possíveis para uma determinada situação e mostra os níveis de confiança para saber a probabilidade de qualquer evento específico ocorrendo. O Crystal Ball<sup>®</sup> roda sobre uma planilha do Microsoft Excel que permite associar distribuições probabilísticas a cada uma das variáveis do modelo que está sendo simulado na planilha (ANDERMAN, 2003; ROCHEDO, 2011).

As distribuições disponíveis pelo software são: normal, triangular, Poisson, binomial, log-normal, uniforme, exponencial, geométrica, Weibull, beta, hipergeométrica e personalizada. As variáveis são normalmente simuladas como variáveis independentes, embora seja possível definir correlações entre as variáveis. Uma vez definidas as variáveis, por meio da seleção da distribuição e definição dos valores estatísticos básicos (por exemplo: mínimo, máximo, média e desvio padrão), o modelo é rodado por um número de vezes, definido pelo usuário, utilizando método de Monte Carlo. A simulação feita por Monte Carlo é estabelecida para

determinar os itens de incerteza em um modelo matemático, envolvendo vários cenários de uma escala de valores definida pelo usuário, ou uma distribuição de probabilidades para cada parâmetro incerto. Para cada simulação realizada é gerado um relatório com o resultado da simulação probabilística, podendo ser apresentado sob forma gráfica ou numérica (ANDERMAN, 2003; ROCHEDO, 2011).

O Crystal Ball<sup>®</sup> é amplamente utilizado no planejamento de educação, da área financeira e nos setores de petróleo, ambiental e de gás, nas telecomunicações, entre outras áreas, por permitir efetuar cálculos probabilísticos, inclusive análise de sensibilidade, correlação e ajuste de dados. A análise de sensibilidade indica qual das variáveis são mais críticas para a incerteza global do valor que se deseja calcular. O recurso de correlação permite ao usuário explicar suas dependências positivas ou negativas dos seus resultados a partir da incerteza dos parâmetros utilizados no cálculo (ANDERMAN, 2003; ROCHEDO, 2011).

Para melhor interpretação dos resultados de dose, o programa efetua a análise estatística utilizando diferentes distribuições de probabilidades para selecionar aquela que melhor se ajusta aos resultados obtidos.

Diversas distribuições podem ser utilizadas e a qualidade do ajuste pode ser analisada por um conjunto de testes estatísticos. Neste trabalho, foram observados apenas dois tipos de distribuições, Distribuição Normal e Log-Normal (FIG. 2.9).

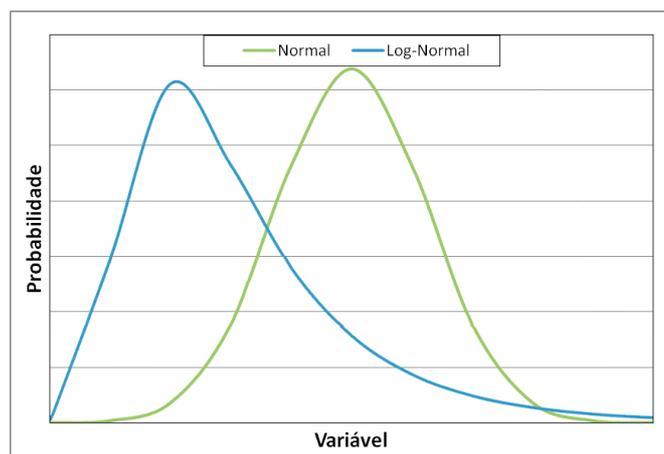


FIG. 3.2 Curvas das distribuições de probabilidade.  
(FONTE: Modificado ROCHEDO, 2011).

Para a análise de incerteza, foram utilizados os efeitos esperados para as fontes que contribuem para a variabilidade das doses para um determinado voo. A

análise integrada de incerteza foi realizada utilizando o programa Crystal Ball<sup>®</sup>. Os dados de entrada para a simulação foram às distribuições de doses observadas para cada uma das três rotas estudadas, cada uma delas multiplicada por fatores representando as variações introduzidas pelos efeitos devido ao ciclo solar (ciclo de 11 anos), à sazonalidade (ciclo de 1 ano) e do tempo na altitude de percurso (variações devido a diferenças nos tempos de subida e descida entre diferentes voos da mesma rota e velocidade média de voo) e a altitude do voo.

A equação utilizada para obter a variabilidade integrada das doses foi:

$$D = D_1 * f_a * f_b * f_c * f_d \quad (3.2)$$

Onde,

D = distribuição de doses esperada para uma determinada rota.

D<sub>1</sub> = distribuição das doses calculadas para todos os voos comerciais descritos no banco de dados para uma determinada rota.

f<sub>a</sub>, f<sub>b</sub>, f<sub>c</sub> e f<sub>d</sub> são fatores criados para representar a variabilidade devido a fatores externos relacionados aos efeitos de variação devido ao ciclo solar, sazonalidade, tempo na altura de cruzeiro e altitude de cruzeiro, respectivamente. Estas distribuições foram geradas a partir dos testes anteriores, considerando média aritmética igual a um e desvio padrão estimado pelo coeficiente de variabilidade de cada efeito.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 BANCO DE DADOS

O banco de dados foi montado baseado nas informações dos voos domésticos no Brasil programados para novembro de 2011. O banco de dados original descrevia 4020 voos, caracterizados por sua sigla, que é composta por 2 letras, representando a companhia, seguida de uma sequência de números. A planilha foi criada de forma a conter todas as informações necessárias para caracterizar o voo e para efetuar o cálculo de dose. Assim, cada voo contém as seguintes informações:

a) Origem do voo:

- Cidade e nome do aeroporto;
- Estado;
- Código do aeroporto (IATA);
- Código do aeroporto (ICAO);
- Horário de partida.

b) Destino do voo:

- Cidade e nome do aeroporto;
- Estado;
- Código do aeroporto (IATA);
- Código do aeroporto (ICAO);
- Horário da chegada.

c) Frequência semanal de voos;

d) Companhia aérea;

e) Número do voo;

f) Sigla do voo;

g) Equipamento utilizado;

h) Número de passageiros de acordo com o tipo de equipamento;

i) Tempo total do voo em minutos;

j) Tempo em minutos:

- Subida;
- Altitude de cruzeiro; e

- Pouso.

k) Altitude média do voo em pés.

Um exemplo da planilha original é apresentado na FIG. 4.1.

Origem			Destino			Freq. Semanal	Id. Voo			Nº de pass.	Tempo total (min)	Tempo (min)			Altitude (pés)
Cidade/Aeroporto	Cód. IATA	Cód. ICAO	Cidade/Aeroporto	Cód. IATA	Cód. ICAO		CIA	Nº do voo	Equip.			Subida	Altitude	Descida	
Rio de Janeiro/Galeão	GIG	SBGL	São Paulo/Congonhas	CGH	SBSP	12345--	B	1385	738	184	61	15	31	15	34000
Rio de Janeiro/Galeão	GIG	SBGL	São Paulo/Congonhas	CGH	SBSP	1234567	B	1394	738	184	61	15	31	15	34000
Rio de Janeiro/Galeão	GIG	SBGL	São Paulo/Congonhas	CGH	SBSP	-234567	B	1383	73G	144	67	15	37	15	34000
Rio de Janeiro/Galeão	GIG	SBGL	São Paulo/Congonhas	CGH	SBSP	12345-7	C	4743	320	162	68	15	38	15	34000
Rio de Janeiro/Galeão	GIG	SBGL	São Paulo/Congonhas	CGH	SBSP	7	A	3889	320	162	88	15	58	15	34000
Rio de Janeiro/Galeão	GIG	SBGL	São Paulo/Congonhas	GRU	SBGR	123456-	B	1571	73G	144	50	15	20	15	34000
Rio de Janeiro/Galeão	GIG	SBGL	São Paulo/Congonhas	GRU	SBGR	123-56-	D	7624	738	184	55	15	25	15	34000
Rio de Janeiro/Galeão	GIG	SBGL	São Paulo/Congonhas	GRU	SBGR	4-7	A	7622	738	184	55	15	25	15	34000

FIG. 4.1 Exemplo do banco de dados criado com as informações sobre o voo.

Após uma verificação para eliminar duplicação de voos para voos comuns a duas companhias, foi efetuada uma validação do banco de dados criado a partir de buscas específicas de voos individuais pela internet, conforme descrito no capítulo anterior (Metodologia). Conclui-se que 95 % dos voos selecionados foram confirmados pelas páginas das companhias na internet; os demais 5 % não foram encontrados porque a companhia responsável por estes voos teve suas atividades encerradas em 2012 e estes voos não foram absorvidos por nenhuma outra companhia. Todos os voos desta companhia que voos teve suas atividades encerradas foram verificados nas companhias que absorveram seus voos e aqueles que não foram confirmados foram retirados do banco de dados.

O banco de dados final inclui 3872 voos domésticos comerciais (doravante denominados Rotas), compondo um quadro de mais de 1.000.000 de voos individuais por ano no Brasil.

O banco de dados foi então complementado com as seguintes informações, para cada Rota descrita:

- Necessidade de correções devido a diferentes fusos horários decorrentes do horário de verão conforme programado para novembro de 2012;
- Tempo total de voo;
- Tempo de subida;
- Tempo de descida;
- Tempo na altitude de cruzeiro;
- Altitude de cruzeiro;
- Número de passageiros por voos;
- Frequência anual de voos;
- Número de passageiros por ano.

Uma vez efetuado o cálculo de dose de forma específica para cada rota, foram acrescentados ao banco de dados as seguintes informações:

- Dose individual recebida durante o voo;
- Dose coletiva associada a cada Rota (caracterizada pela sigla), considerando a frequência do voo e o número de passageiros da aeronave que serve regularmente a Rota.

#### 4.2 ANÁLISE DE FONTES DE VARIABILIDADE E INCERTEZA RELATIVA AOS DADOS DE ENTRADA PARA O PROGRAMA DE CÁLCULO DE DOSE

A FIG. 4.2 e FIG. 4.3 apresentam a variabilidade prevista para o Rio de Janeiro - Porto Alegre, voo com duração de duas horas, assumindo um período de 15 minutos na decolagem, até uma altitude de cruzeiro com duração em média de 90 minutos e uma altitude de 34.000 pés, e 15 minutos na descida, totalizando 2 horas de voo.



FIG. 4.2 Doses estimadas nos voos realizados do Rio de Janeiro a Porto Alegre no mesmo mês em anos diferentes.

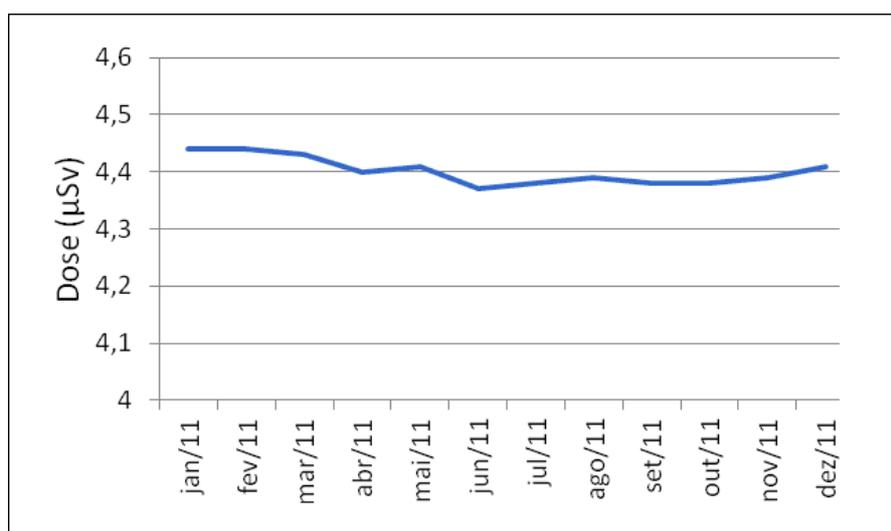


FIG. 4.3 Doses estimadas nos voos realizados do Rio de Janeiro a Porto Alegre para diferentes meses do mesmo ano.

Pode ser observado que a variabilidade dentro de um único ano é muito menor do que a variabilidade dentro de um ciclo de atividade solar de 11 anos.

Os resultados para efeitos de latitude são mostrados na TAB 4.1.

**TAB. 4.1 Taxa de dose dos voos com altitude de 34.000 pés para diferentes voos dentro do Brasil.**

Origem			Destino			Taxa de dose ( $\mu\text{Sv/h}$ )
Cidade / Aeroporto	Cód. IATA	Cód. ICAO	Cidade / Aeroporto	Cód. IATA	Cód. ICAO	
Rio de Janeiro / Galeão	GIG	SBGL	Porto Alegre / Salgado Filho	POA	SBPA	2,70
Rio de Janeiro / Galeão	GIG	SBGL	Manaus / Eduardo Gomes	MAO	SBEG	2,41
Rio de Janeiro / Galeão	GIG	SBGL	Salvador / Dep. Luís Eduardo Magalhães	SSA	SBSV	2,51
Rio de Janeiro / Galeão	GIG	SBGL	Brasília / Presidente JK	BSB	SBBR	2,52
Rio de Janeiro / Galeão	GIG	SBGL	São Paulo / Guarulhos	GRU	SBGR	2,62
Porto Alegre / Salgado Filho	POA	SBPA	Manaus / Eduardo Gomes	MAO	SBEG	2,46
Média						2,54
Desvio padrão						0,11
Coeficiente de Variação - CV (%)						4,19

Um resumo estatístico dos resultados obtidos para a variação da dose devido a variações decorrentes de variações nos dados de entrada do programa CARI-6 e de condições sazonais e periódicas está apresentado na TAB. 4.2.

**TAB. 4.2 Resumo dos resultados das simulações.**

Fonte de incerteza	Características voos	Dose média ( $\mu\text{Sv}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{Sv}$ )	Coeficiente de variação (%)
Sazonalidade *	Voos mensais	4,40	0,02	0,56
Ciclo solar *	Voos anuais	4,36	0,11	2,49
Altitude *	30.000-38.000 pés	4,41	1,21	27,31
Tempo de subida e descida até a altitude de cruzeiro **	5 a 15 min.	4,71	0,32	6,79
Tempo na altitude ***	100 a 140 min.	4,71	0,70	14,93

\* 15 min subida e descida, 120 min de voo.

\*\* 120 minutos total do voo.

\*\*\* 10 minutos subida e descida.

Com base nestes resultados, foi decidido que neste trabalho deveria utilizar no cálculo de doses devido aos voos individuais considerando o tempo de voo nominal para cada rota, de acordo com o previsto pelas companhias aéreas.

Além do tempo de voo, a principal fonte de variabilidade em doses de voo está relacionada com a altitude do voo. Para a altitude média a ser utilizada por todos voos de grande porte (aeronaves com mais de 80 passageiros) foi considerada então uma altitude média de cruzeiro de 34.000 pés para cada rota. As condições de sazonalidade foram verificadas como sendo muito pequenas, permitindo ser desprezada, desta forma, utilizamos as médias anuais definidas pelo próprio programa.

O ano de referência é 2011, para o qual os dados de todos os voos estão disponíveis. A extrapolação para outros anos não deve ser realizada devido à diferença de rotas de voos e ao efeito do ciclo solar em altitudes de voos comerciais. O efeito do ciclo solar nas doses estimadas deverá ser avaliado posteriormente na análise integrada de incerteza. Embora o efeito da latitude possa contribuir apenas com cerca de 5% de variação nas doses para os voos dentro do Brasil, as rotas individuais serão mantidas na análise para permitir avaliações regionais no país.

#### 4.3 CÁLCULO DE DOSE

As doses individuais médias avaliadas para voos domésticos no Brasil estão na faixa de 0,03 até 8,8  $\mu\text{Sv}$ . Pode-se observar que esses voos individuais têm contribuição muito pequena para a exposição global de passageiros para fontes de radiação natural. Apesar de não ser submetido à regulamentação, como esta exposição é considerada como voluntária, a exposição de voos individuais está abaixo do nível de dose de 10  $\mu\text{Sv}$ . No entanto para passageiro frequente, pode ter doses superiores a este nível, embora abaixo do nível de intervenção de 10  $\text{mSv/a}$  (CNEN, 2005). A média da dose em voos domésticos individuais foi de 2,8  $\mu\text{Sv}$ . Foi estimada a existência de mais de 1 milhão de voos individuais por ano no país, envolvendo a movimentação de cerca de 135 milhões de pessoas pelos aeroportos brasileiros. A dose coletiva estimada foi de 429 homem-Sv. Estes valores representam, em média, um acréscimo de 0,11 % na exposição dos passageiros,

por voo realizado, e um acréscimo de cerca de apenas 0,09 % para a população do país.

Esta variação é pequena, considerando que a variação natural da dose devido à radiação cósmica na superfície da Terra foi estimada ser em torno de 84 % em relação ao valor médio de 0,38 mSv/a (UNSCEAR, 2008). A dose média estimada para os passageiros de voos domésticos comerciais no Brasil corresponderia, por exemplo, à exposição à radiação cósmica devido a uma permanência de menos de 2 dias na cidade do México.

É também considerada uma variação pequena, quando se considera a variabilidade natural da taxas de exposição externa em uma determinada área, devido, principalmente, à contribuição da radiação terrestre. Por exemplo, um levantamento efetuado no contorno da Baía de Guanabara, entre as cidades do Rio de Janeiro e Niterói, apresentou uma variação de 18 a 100 nSv/h nas taxas de dose medidas, variando em função do tipo de área (por exemplo, proximidade de praia ou montanha, e do tipo de cobertura (urbanização) (SOUZA et al., 2007). Já na região do Planalto de Poços de Caldas, medidas de taxa de dose externa variaram na faixa de 100 a 340 nGy/h. A taxa de dose externa média para áreas urbanizadas apresentou um valor cerca de 20 % daquele observada na área rural circunvizinha (VEIGA et al, 2003).

Desta forma, conclui-se que a variação observada é pequena, quando comparada com a variabilidade natural a que as pessoas estão acostumadas a receber na sua vida normal.

#### 4.3.1 ESTADOS BRASILEIROS

Os principais resultados obtidos para os diferentes estados brasileiros, considerando apenas voos com origem em cada estado são apresentados na TAB.

4.3.

**TAB. 4.3 Resumo dos resultados para voos com origem nos diferentes estados brasileiros.**

Estado	Região	Voos/ano	Passageiros/ano	Dose coletiva (homem Sv/a)	Dose média ( $\mu$ Sv/voo)
DF	CO	80.080	12.091.456	45,50	3,76
GO	CO	18.356	2.130.856	5,20	2,44
MS	CO	10.764	1.337.492	3,63	2,71
MT	CO	21.060	2.205.632	6,25	2,83
AC	N	3.016	394.368	1,51	3,83
AM	N	17.784	2.437.916	11,75	4,82
AP	N	2.132	341.224	0,38	1,11
PA	N	27.664	3.422.484	10,63	3,11
RO	N	8.684	972.712	3,10	3,19
RR	N	1.456	237.328	0,51	2,14
TO	N	5.096	478.452	1,15	2,41
AL	NE	5.565	872.185	4,21	4,83
BA	NE	53.872	7.809.672	28,09	3,60
CE	NE	23.504	3.673.748	16,21	4,41
MA	NE	11.336	1.728.688	6,15	3,56
PB	NE	6.032	959.192	5,32	5,54
PE	NE	32.448	4.919.356	22,37	4,55
PI	NE	2758	916240	3,30	3,60
RN	NE	11.180	1.819.220	8,10	4,45
SE	NE	7.852	1.046.344	3,44	3,29
PR	S	54.860	7.423.000	16,69	2,25
RS	S	43.004	5.812.924	19,03	3,27
SC	S	30.992	4.113.668	8,95	2,18
ES	SE	19.084	2.428.660	5,62	2,32
MG	SE	80.497	9.373.561	23,64	2,52
RJ	SE	114.296	16.877.900	51,23	3,04
SP	SE	236.496	33.209.540	108,52	3,27

CO: Centro Oeste; N: Norte; NE: Nordeste; S: Sul; SE: Sudeste.

A população total de cada estado está apresentada na FIG. 4.4. As cores nas figuras representam as regiões em que os estados se encontram.

Para facilitar a visualização, os resultados comparativos entre os estados brasileiros são mostrados nas figuras, descritas a seguir, também considerando apenas voos com saída de aeroportos de cada estado (isto é, nesta análise são

considerados apenas voos de ida a partir de sua origem, para evitar duplicação de resultados).

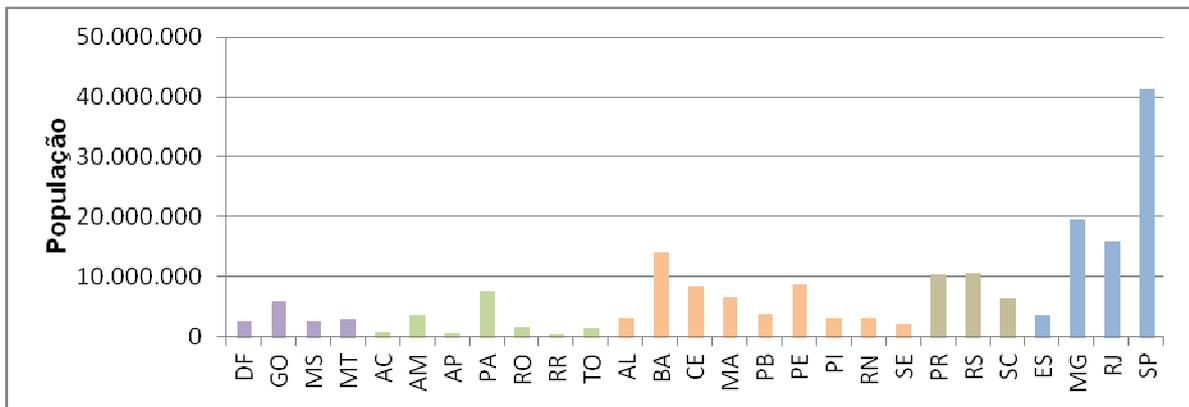


FIG. 4.4 População estadual.  
(FONTE: IBGE, 2012).

Na FIG. 4.5 estão apresentados os resultados de dose coletiva para voos com origem em cada um dos estados do Brasil.

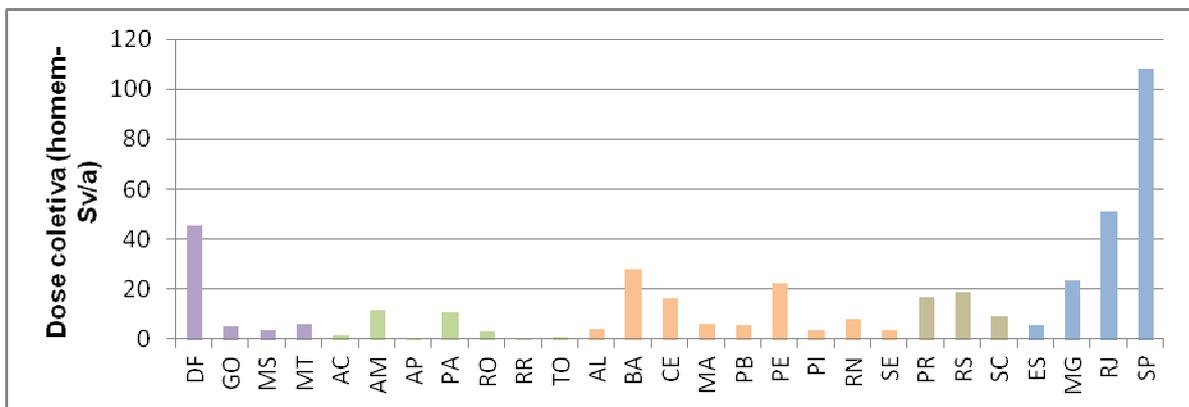


FIG. 4.5 Dose coletiva relativa à voos com origem em cada estado.

Na FIG. 4.6, podemos observar que o Distrito Federal e o estado do Rio de Janeiro são os únicos que apresentam valor superior a 1 para a relação entre número de passageiros e a população total, sendo que a relação para o Distrito Federal é bastante superior (4,7) à do estado do Rio de Janeiro, que permanece próximo a 1,0. Os demais estados apresentam valores na faixa de 0,23 (PB) a 0,8 (SP).

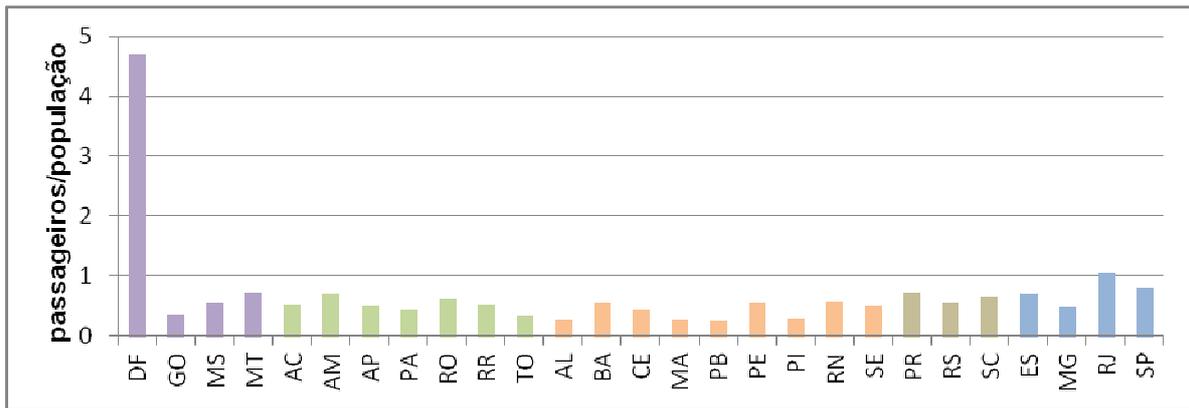


FIG. 4.6 Relação entre o número de passageiros e a população estadual total.

A FIG. 4.7 mostra a correlação entre a dose coletiva associada aos passageiros com trânsito nos aeroportos de um determinado estado e o número de residentes do mesmo estado. Uma análise para verificar possíveis *outliers* mostrou que o principal ponto que distorce a correlação corresponde Distrito Federal. Conforme já observado neste trabalho, este local, por compreender a capital do país tem uma movimentação de pessoas por residente muito superior aos estados, decorrente, principalmente das atividades políticas ali desenvolvidas.

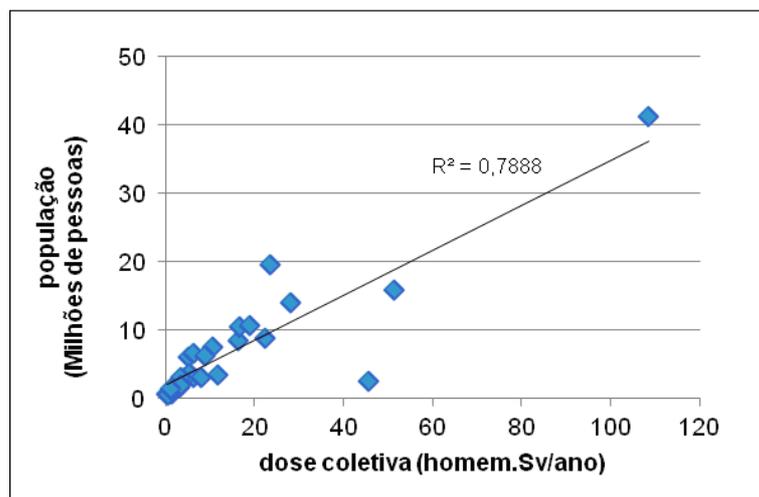


FIG. 4.7 Relação entre a dose coletiva e a população residente de cada estado do Brasil.

A FIG. 4.8 mostra a mesma análise sem incluir o Distrito Federal. Pode ser observado que a correlação obtida é bastante superior à anterior (FIG 4.7),

mostrando que o país apresenta um comportamento bastante homogêneo em relação ao número de passageiros em trânsito por habitante de cada estado.

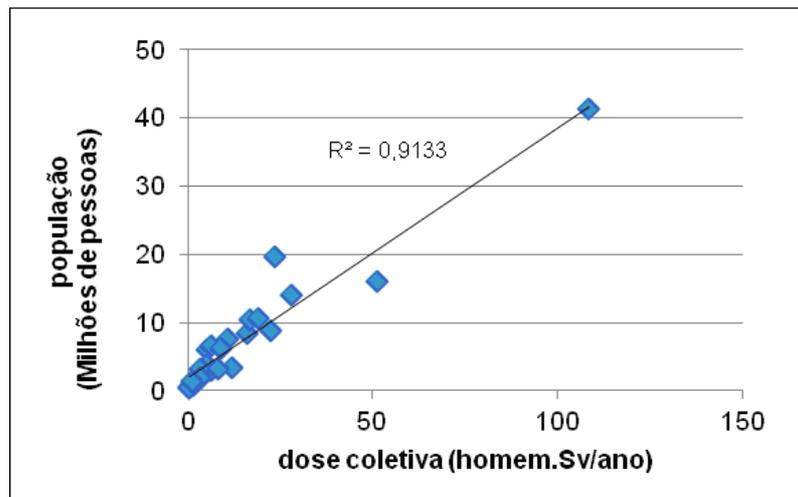


FIG. 4.8 Relação entre a dose coletiva e a população residente de cada estado do Brasil, exceto o Distrito Federal.

A FIG. 4.9 apresenta o número total de voos com origem em cada estado. Observamos que o estado que apresenta maior número de voos por ano é São Paulo (SP), seguido pelo estado do Rio de Janeiro e pelo Distrito Federal. Desta forma, partimos para avaliar os principais voos envolvendo estes três estados.

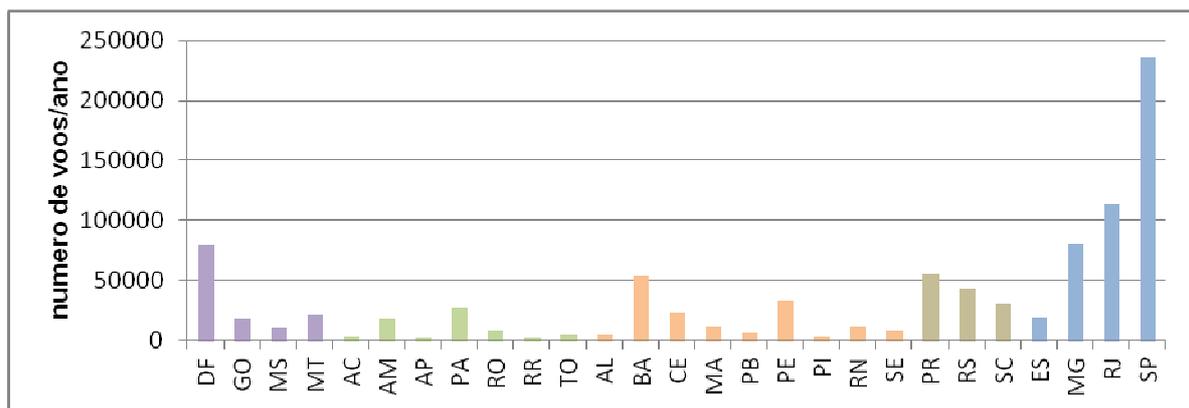


FIG. 4.9. Número de voos por ano partindo de cada estado.

#### 4.3.2 VOOS ESPECÍFICOS

A localização dos principais aeroportos das cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília é apresentada na TAB. 4.4. Os voos diretos entre estas três cidades representam cerca de 10 % do total de voos de todo o Brasil. Os resultados de dose para os voos diretos entre as cidades são apresentados na TAB. 4.5.

**TAB. 4.4 Localização dos principais aeroportos do Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília.**

Cidade	Código IATA	Código ICAO	Latitude	Longitude	Elevação (m)
Rio de Janeiro	GIG	SBGL	22° 48' 50" S	43° 14' 60" W	9
	SDU	SBRJ	22° 54' 39" S	43° 09' 50" W	8
São Paulo	GRU	SBGR	23° 26' 00" S	46° 28' 20" W	750
	CGH	SBSP	23° 37' 60" S	46° 39' 20" W	802
Brasília	BSB	SBBR	15° 51' 80" S	47° 54' 80" W	1060

**TAB. 4.5 Dose individual para passageiros em voos domésticos diretos entre as cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília.**

Rotas	% do n° total de voos	Dose individual ( $\mu\text{Sv}$ )	
		Média	Desvio padrão
Rio - São Paulo	4,7	1,80	0,43
Rio - Brasília	1,9	3,37	0,38
São Paulo - Brasília	3,2	3,24	0,28

A maior dose está relacionada ao voo Rio-Brasília. Um passageiro efetuando viagens semanais entre estas duas cidades receberia em torno de 0,35 mSv/a de acréscimo de dose, ou seja, um aumento de 14,6 % em relação à sua exposição à radioatividade natural (considerando a média mundial de 2,4 mSv/a (UNSCEAR, 2008)).

Considerando a cidade do Rio de Janeiro, verificamos cerca de 500 códigos de voo, com diferentes frequências semanais, utilizando os dois aeroportos da cidade do Rio de Janeiro, totalizando 219.000 voos por ano. A análise estatística das doses para cada rota entre cidades do Brasil e a cidade do Rio de Janeiro está apresentado na TAB.4.6.

Considerando o número total de voos e capacidade total de cada tipo de aeronave utilizada em cada rota, estimamos um número total de passageiros utilizando os aeroportos da cidade do Rio de Janeiro em cerca de 30 milhões, com uma dose coletiva de 98,88 homem-Sv/a, com uma dose individual média de 2,99  $\mu$ Sv/a, bastante semelhante à média estimada para os diferentes códigos de voo (TAB. 4.6). A FIG. 4.10 apresenta a taxa de dose média para cada voo. Pode ser observado que para voos com menos de 2 horas, a taxa de dose aumenta com o tempo total de voo, até que, a partir de cerca de 2 horas de voo, a taxa de dose independe do tempo de voo, sendo praticamente constante. Isto mostra o efeito do tempo de subida e descida nas doses para voos curtos, enquanto que para voos com mais de 2 horas, o tempo de subida e descida da aeronave influenciam pouco na taxa de dose média do voo.

**TAB. 4.6 Descrição estatística do código de voos da Cidade do Rio de Janeiro.**

<b>Destino</b>	<b>Nº de cód. de voo</b>	<b>Dose média (<math>\mu</math>Sv)</b>	<b>Desvio Padrão (<math>\mu</math>Sv)</b>	<b>Mínimo (<math>\mu</math>Sv)</b>	<b>Maximo (<math>\mu</math>Sv)</b>
Aracaju/Santa Maria	6	5,15	0,22	4,97	5,40
Belém	6	7,80	0,21	7,63	8,03
B.H. / T. Neves	56	1,80	0,29	1,10	2,30
Brasília	38	3,31	0,38	2,40	4,00
Campinas	40	1,89	0,38	1,30	3,00
Campo Grande	2	4,20	0,00	4,20	4,20
Curitiba	28	2,61	0,52	1,31	3,20
Florianópolis	8	3,16	0,22	2,99	3,48
Fortaleza	12	7,25	0,28	6,95	7,67
Foz do Iguaçu	8	4,40	0,36	4,10	4,90
Ilhéus	4	3,55	0,92	2,90	4,20
João Pessoa	8	6,34	0,14	6,20	6,53
Juiz de Fora/F. de Assis	4	0,16	0,01	0,15	0,16
Maceió	4	6,01	0,41	5,72	6,30
Manaus	4	8,33	0,62	7,89	8,77
Natal	10	6,80	0,22	6,49	7,02
Porto Alegre	22	4,27	0,25	4,00	4,86
Porto Seguro	6	3,37	0,45	2,90	3,80
Recife	24	6,35	0,46	5,12	6,88
Ribeirão Preto	8	1,98	0,11	1,90	2,13
Salvador	22	4,18	0,33	3,77	4,77
São José do Rio Preto	2	1,70	0,00	1,70	1,70
São José dos Campos	6	0,21	0,06	0,16	0,27
São Luiz	6	7,19	0,06	7,12	7,24
São Paulo/Congonhas	82	1,69	0,43	0,91	2,90
São Paulo/Guarulhos	34	1,92	0,39	1,25	2,60
Teresina	2	6,40	0,00	6,40	6,40
Uberlândia	4	2,55	0,35	2,30	2,80
Vitória	36	1,83	0,33	1,10	2,30
<b>GLOBAL</b>	<b>498</b>	<b>3,04</b>	<b>1,91</b>	<b>0,15</b>	<b>8,77</b>

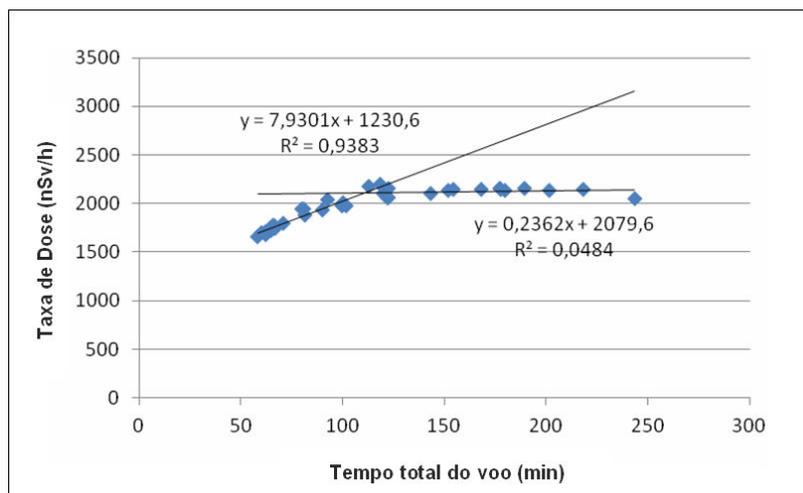


FIG. 4.10 Taxa de dose em voos domésticos a partir ou para a cidade do Rio de Janeiro.

O número total de passageiros, para cada rota incluindo da cidade do Rio de Janeiro, é apresentado na FIG. 4.11.

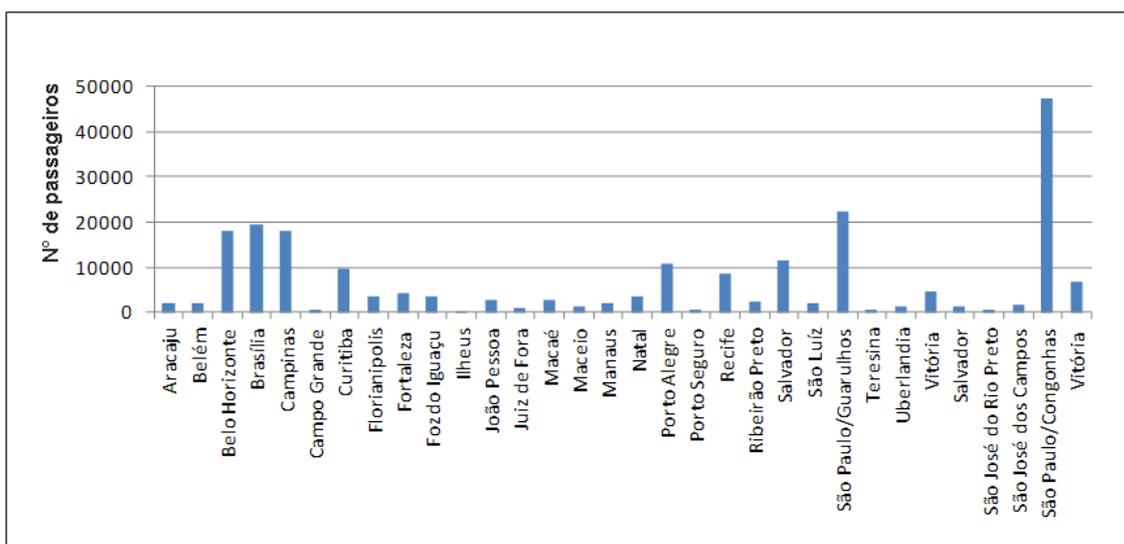


FIG. 4.11 Número de passageiros em diferentes rotas de e para a cidade do Rio de Janeiro.

Os voos na rota Rio-São Paulo representam cerca de 32 % do total de passageiros que utilizam os aeroportos das cidades do Rio de Janeiro e de São Paulo. As doses nesta rota variaram em uma taxa de 0,9 a 2,9  $\mu\text{Sv}$ , variando com o aeroporto e o tipo de avião utilizado. Utilizando o valor médio de dose estimado para todos os voos na rota Rio-São Paulo, obteve-se o valor de 1,76  $\mu\text{Sv}$ . Um viajante

frequente, efetuando voos semanais de ida e volta entre estas duas cidades receberia um total de 0,18 mSv por ano. Apesar de superior ao valor de isenção para práticas, de 10  $\mu$ Sv/a, por não ser considerada uma prática, o valor a ser comparado com o valor de dose previsto seria o nível de intervenção. Usando o valor médio mundial de exposição à radiação natural de 2,4 mSv/a, teríamos um valor de dose total de cerca de 2,6 mSv/a, bastante inferior, portanto, do que os níveis recomendados de intervenção, de 10 mSv/a.

Um acréscimo de 0,18 mSv/a na exposição à radiação cósmica corresponderia ao acréscimo de dose que uma pessoa que morasse em uma cidade recebendo a média mundial de 0,38 mSv/a passasse cerca de dois meses e meio em uma cidade como a cidade do México, localizada a cerca de 2.000 m de altitude.

A rota Rio-São Paulo representa cerca de 7 % dos voos efetuados e cerca de 8 % dos passageiros com trânsito anual no país. Por ser um voo relativamente curto, esta rota responde por apenas 4,4 % da dose coletiva total do Brasil.

#### 4.4 ANÁLISE DE INCERTEZA

As distribuições utilizadas para os fatores  $f_a$ ,  $f_b$ ,  $f_c$  e  $f_d$ , que conforme descrito na seção de Metodologia, item 3.3.2, representam as variações esperadas associadas ao efeito do ciclo solar, a efeitos de sazonalidade, variação do tempo na altitude de cruzeiro e variações esperadas na altitude de cruzeiro, respectivamente, estão apresentadas nas FIG. 4.12 a 4.15, e os parâmetros estatísticos utilizados estão descritos na TAB. 4.7. As distribuições foram consideradas com distribuições normais.

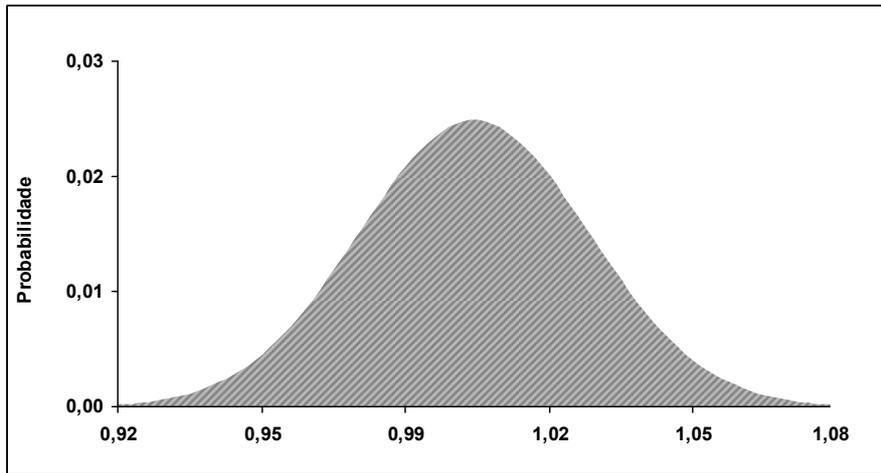


FIG. 4.12 Distribuição utilizada para o parâmetro  $f_a$ , representando a variabilidade possível de ser introduzida pelo ciclo solar.

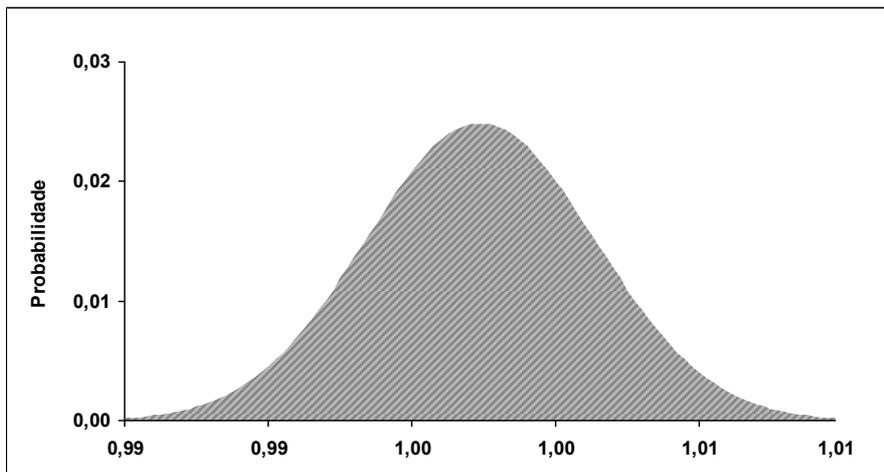


FIG. 4.13 Distribuição utilizada para o parâmetro  $f_b$ , representando a variabilidade possível de ser introduzida pela sazonalidade anual.

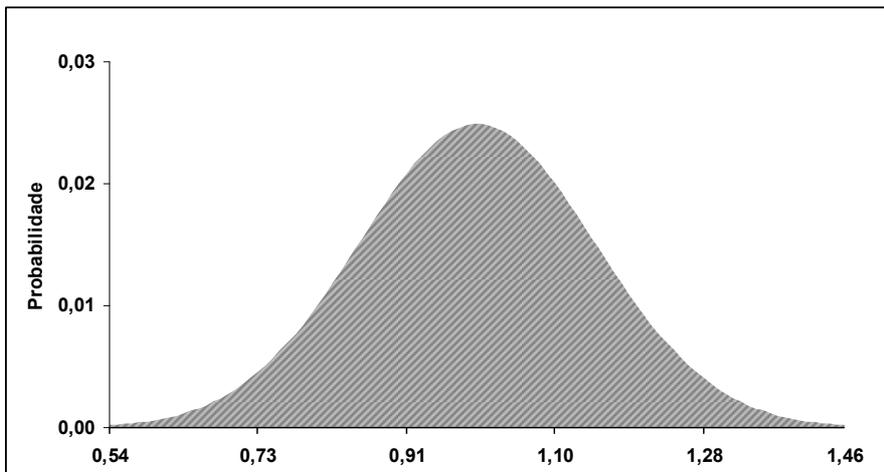


FIG. 4.14 Distribuição utilizada para o parâmetro  $f_c$ , representando a variabilidade associada a variações no tempo de voo na altitude de cruzeiro.

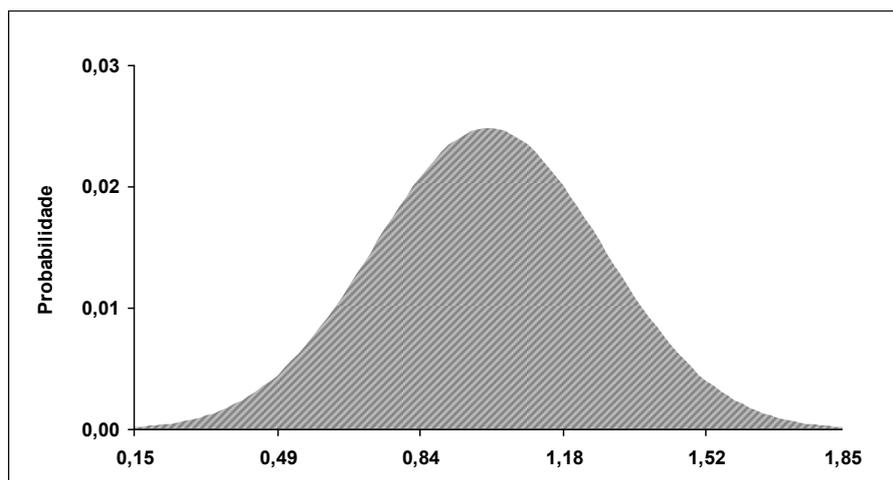


FIG. 4.15 Distribuição utilizada para o parâmetro  $f_d$ , representando a variabilidade associada a variações na altitude média de cruzeiro.

**TAB. 4.7 Parâmetros das distribuições utilizadas para os fatores  $f_a$ ,  $f_b$ ,  $f_c$  e  $f_d$ .**

Fator	Efeito	Distribuição	Média	Desvio padrão
$f_a$	Ciclo solar	Normal	1	0,025
$f_b$	Sazonalidade	Normal	1	0,006
$f_c$	Tempo de voo na altitude de cruzeiro	Normal	1	0,149
$f_d$	Altitude de cruzeiro	Normal	1	0,274

As distribuições utilizadas para o parâmetro  $D_1$  foram obtidas por ajuste estatístico de distribuição a partir dos dados individuais de todos os voos em uma determinada rota. As rotas selecionadas para esta análise foram àquelas relacionadas às três cidades com maior número de voos no país, São Paulo, Rio de Janeiro e Brasília. Apenas os voos diretos entre as cidades foram considerados. Os ajustes foram efetuados utilizando o programa WinGraf. Os parâmetros das distribuições obtidas estão apresentados na TAB 4.8. As distribuições foram consideradas nesta análise como distribuições normais. A variação observada nos valores de  $D_1$  para cada rota inclui as diferenças entre diferentes tipos de aeronaves e, conseqüentemente, no tempo de voo, e diferenças decorrentes de haver mais de um aeroporto nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo efetuando a mesma rota e, portanto, também com diferentes tempos de voo.

**TAB. 4.8 Resumo Estatístico dos valores de D1 para a análise de incerteza.**

<b>Itinerário</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio</b>
RJ – SP	1,73	0,47
RJ – DF	3,33	0,34
SP – DF	3,24	0,25

Com os resultados das TAB 4.7 e TAB. 4.8, a distribuição D, para cada rota estudada, foi gerada utilizando o programa Crystall Ball<sup>®</sup>, realizando 10.000 simulações para cada rota.

#### 4.4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DE INCERTEZAS

A curva de resposta do modelo para a rota de voos diretos entre as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo é apresentada na FIG. 4.16 e o resumo estatístico dos resultados está apresentada na TAB. 4.9. Pode ser observado que, conforme esperado, não houve alteração significativa do valor médio, em relação ao valor de  $D_1$  para esta rota, mas houve um aumento do desvio, uma vez que mais fatores foram incluídos por afetarem a variabilidade dos voos. As variações incluídas levaram a um aumento de cerca de 57 % no desvio padrão observado para as doses dos voos nas condições padrão de cálculo, isto é, tempo fixo de subida e descida das aeronaves, altitude de cruzeiro fixa e calculadas para as condições sazonais médias para o ano de 2011. O programa indicou também que, apesar de todas as distribuições utilizadas associadas aos parâmetros do modelo fossem normais, os resultados da simulação levaram a um melhor ajuste pela distribuição log-normal.

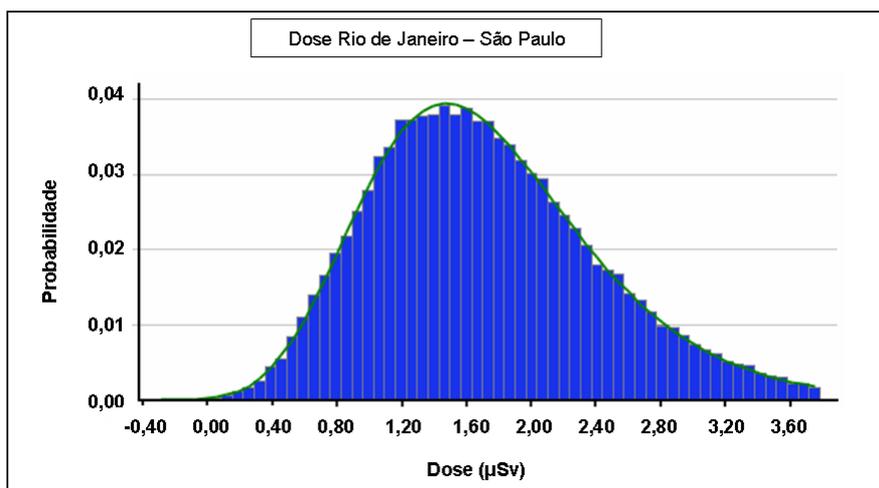


FIG. 4.16 Distribuição gerada para as doses recebidas em voos entre as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo.

**TAB. 4.9 Resumo estatístico para a rota RJ-SP.**

<b>Estatística</b>	<b>Valores de previsão</b>
Avaliações	10.000
Caso Base	1,73
Média	1,73
Mediana	1,65
Moda	---
Desvio Padrão	0,73
Variância	0,54
Obliquidade	0,74
Curtose	3,94
Coefficiente de Variabilidade	0,42
Mínimo	-0,39
Máximo	9,38
Largura do Intervalo	9,77

A curva de resposta do modelo para a rota de voos diretos entre as cidades do Rio de Janeiro e Brasília (Distrito Federal) é apresentada na FIG 4.17 e o resumo estatístico dos resultados está apresentado na TAB 4.10. Pode ser observado que, conforme esperado, também não houve alteração significativa do valor médio em relação ao valor de  $D_1$  para esta rota, mas houve um aumento do desvio, uma vez que mais fatores foram incluídos por afetarem a variabilidade dos voos. A diferença observada aqui é bem superior àquela observada para os voos na rota Rio - São

Paulo, chegando a 220 %. O programa também indicou um melhor ajuste log-normal para as doses nesta rota. A diferença grande se deve ao fato de que havia uma normal, com CV (coeficiente de variação) pequeno e agora obtivemos uma distribuição log-normal.

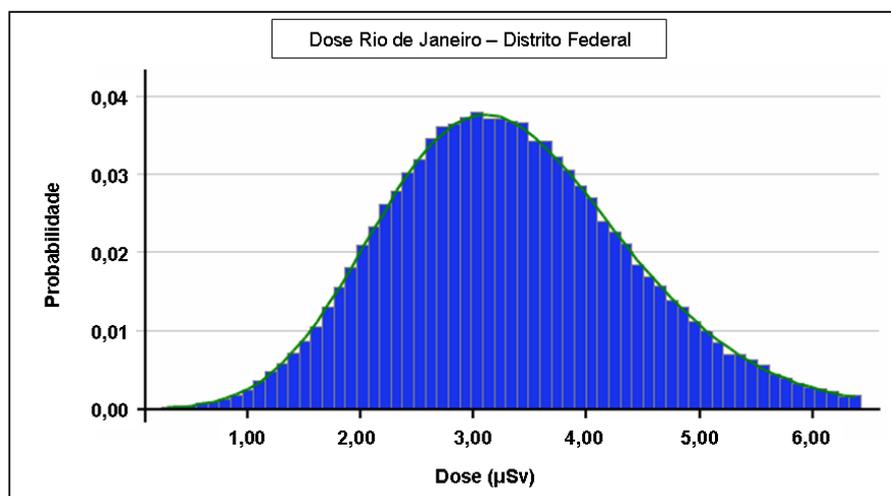


FIG. 4.17 Distribuição gerada para as doses recebidas em voos entre as cidades do Rio de Janeiro e Distrito Federal.

**TAB. 4.10 Resumo estatístico para rota RJ-DF.**

Estadística	Valores de previsão
Avaliações	10.000
Caso Base	3,33
Média	3,33
Mediana	3,25
Moda	---
Desvio Padrão	1,11
Variância	1,22
Obliquidade	0,46
Curtose	3,43
Coeficiente de Variabilidade	0,33
Mínimo	-0,90
Máximo	10,43
Largura do Intervalo	11,32

A curva de resposta do modelo para a rota de voos diretos entre as cidades do São Paulo e Brasília (Distrito Federal) é apresentada na FIG 4.18 e o resumo

estatístico dos resultados está apresentado na TAB 4.11. Pode ser observado que, também nesta rota, conforme esperado, não houve alteração significativa do valor médio, em relação ao valor de  $D_1$ , mas houve um aumento de quase 320 % no desvio padrão, tendo o modelo também indicado uma distribuição log-normal para os resultados gerados.

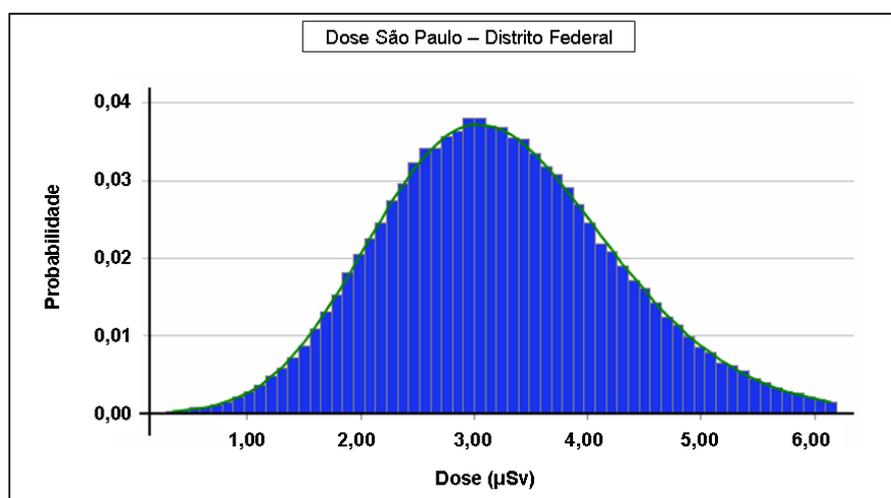


FIG. 4.18 Distribuição gerada para as doses recebidas em voos entre as cidades de São Paulo e Distrito Federal.

**TAB. 4.11 Resumo estatístico para rota SP-DF.**

Estatística	Valores de previsão
Avaliações	10.000
Caso Base	3,24
Média	3,24
Mediana	3,17
Moda	---
Desvio Padrão	1,05
Variância	1,11
Obliquidade	0,41
Curtose	3,34
Coefficiente de Variabilidade	0,32
Mínimo	-0,97
Máximo	10,01
Largura do Intervalo	10,98

#### 4.4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

Os resultados da análise de sensibilidade paramétrica, de acordo com a relevância de cada parâmetro para a variância dos resultados de dose das diversas rotas estudadas, são apresentados na TAB. 4.12.

**TAB. 4.12 Resultados da análise de sensibilidade paramétrica na variância.**

Fonte de variação	RJ – SP	RJ – DF	SP – DF
Voo normal (aeroportos e aeronaves)	43,2	8,8	5,2
Ciclo solar	0,4	0,6	0,7
Sazonalidade	0	0	0
Tempo na altitude	12,3	19,8	20,8
Altitude média de cruzeiro	44,1	70,8	73,2

Em todos os casos, o fator que mais afeta as doses previstas para um determinado voo é a altitude média de cruzeiro. Este valor varia ao longo de um voo, de acordo com o tráfego aéreo e as condições de tempo, mas também varia, para uma determinada rota, entre voos de ida e de volta, que costumam ser efetuados em altitudes diferentes. O efeito da altitude média de cruzeiro é menor para o voo Rio-São Paulo, por serem voos mais curtos e, por envolverem quatro aeroportos, dois em São Paulo e dois no Rio de Janeiro, incluindo uma diversidade grande de aviões e, portanto, as doses calculadas em condições padronizadas apresentaram uma variação maior (CV = 27 %) do que os demais voos incluídos nesta análise (Rio - Brasília: três aeroportos, sendo dois no Rio de Janeiro e um em Brasília, apresentou CV = 10 %; São Paulo-Brasília: três aeroportos, sendo dois em São Paulo e um em Brasília, apresentou CV = 8 %).

Por estes mesmos motivos, a contribuição para a incerteza devido à variações entre voos padronizados da mesma rota foi mais significativa no circuito Rio - São Paulo do que para as demais rotas estudadas, sendo que a contribuição na rota Rio - Brasília foi superior à da rota São Paulo-Brasília.

A variação devido ao tempo na altitude de cruzeiro, que inclui as diferenças nos tempos de pouso e decolagem, variaram menos, aproximadamente na faixa de 12 a 20 %, sendo que o menor efeito foi para a rota Rio - São Paulo e, apenas neste

caso, inferior ao efeito da altitude média de cruzeiro descrito anteriormente, que inclui a diversidade de aeroportos e aeronaves, conforme descrito na banco de dados dos voos.

O ciclo solar mostrou ter pequeno efeito na incerteza geral do modelo, contribuindo apenas com 0,4 a 0,7 da variância observada para as diferentes rotas. Esta análise confirmou que o efeito da sazonalidade na incerteza geral do cálculo é desprezível, reforçando a validade de utilizar a média anual das condições de voo, conforme permitido pelo modelo e utilizado neste estudo.

## 5 CONCLUSÃO

Foi elaborado um banco de dados com cerca de 4.000 diferentes voos domésticos no Brasil, compreendendo cerca de 1.000.000 voos individuais. Os campos incluídos no banco de dados, tais como origem e destino dos voos, o tempo total de voo, tipo de avião, número de passageiros, altitude de cruzeiro, tempo de subida, da decolagem até a altitude de cruzeiro e o tempo de descida para pouso, foram usados para obter um quadro da exposição atual dos membros do público em voos comerciais no território nacional e sua contribuição para a exposição do público a fontes de radiação natural.

As doses em voos domésticos no Brasil variam de 0,03 a 8,8  $\mu\text{Sv}$ . A média da dose efetiva em voos domésticos individuais foi de 2,8  $\mu\text{Sv}$ . Foi constatado existirem mais de 1 milhão de voos individuais por ano no país, envolvendo a movimentação de cerca de 135 milhões de pessoas pelos aeroportos brasileiros. A dose coletiva estimada foi de 429 homem-Sv.

Estes valores representam, em média, um acréscimo de 0,11 % na exposição à radiação cósmica dos passageiros, por voo realizado, e um acréscimo de cerca de apenas 0,09 % com média, para a população do país.

Apenas dois estados apresentaram razão entre o número de passageiros e a população estadual superior a 1,0, o Estado do Rio de Janeiro e o Distrito Federal. O estado que apresenta o maior número de voos é o Estado de São Paulo, seguido pelo Estado do Rio de Janeiro e pelo Distrito Federal.

A rota Rio - São Paulo representa cerca de 7% dos voos efetuados e cerca de 8 % dos passageiros com trânsito anual no país. Por ser um voo relativamente curto, esta rota responde por apenas 4,4 % da dose coletiva total em passageiros devido à voos comerciais no Brasil.

A principal fonte de incerteza avaliada para voos em uma mesma rota se deve a variações na altitude média de voo. Este valor pode variar ao longo de um voo, de acordo com o tráfego aéreo e as condições de tempo, mas também varia, para uma determinada rota, entre voos de ida e de volta, que costumam ser efetuados em altitudes diferentes.

Espera-se que o perfil atual de exposição do público à radiação cósmica durante voos aéreos possa servir como base para futuras comparações da exposição devido ao crescimento da aviação civil no país.

Embora esta exposição não seja regulada, por ser considerada uma exposição voluntária, onde o risco associado à exposição é recebida pela mesma pessoa que recebe o benefício da ação levando à exposição, esta avaliação deve também abrir perspectivas para discussões sobre o conceito de risco, sua avaliação e sua aceitação pública, relevante para o estabelecimento de diretrizes de proteção radiológica.

No caso da exposição em voos comerciais, observou-se que mesmo passageiros frequentes, efetuando voos semanais entre as cidades de maior fluxo de passageiros, que foram verificadas serem as cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e Brasília, receberiam, no máximo, acréscimos da ordem de 0,35 mSv/a, para a rota Rio - Brasília, o que representa um aumento inferior a 15 % da sua exposição total à radioatividade natural.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRBUS, Leading aircraft manufacturer. Disponível em: <www.airbus.com> Acesso em Abril de 2012.
- AMADOR, M. **Radiação Cósmica**. Mestrado Integrado em Engenharia Biomédica Instituto Superior Técnico n° 58484, Lisboa, 2011.
- ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. Disponível em: <www.anac.gov.br> Acesso em 2012.
- ANDERMAN, E. R. **Review of Crystal Ball**. Instrumentation Northwest, 2003.
- ARCANJO, J. S., FERREIRA, N. C. R. **Comportamento do sensor de estrelas a bordo do satélite CBERS-2B na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS)**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 Abril 2009, INPE, p. 1935-1941. 2009.
- ATR, ATR Aircraft. Disponível em: <www.atraircraft.com> Acesso em Abril de 2012.
- AUGUSTO, C. R. A. A. **Observação do excesso e déficit de múons no nível do mar em associação com eventos solares transientes**. Tese (Doutorado em Física) Universidade Federal Fluminense, 2006.
- BAGSHAW, M. **Cosmic radiation in commercial aviation**. Elsevier Science. Travel Medicine and Infectious Disease 6, p. 125–127, 2008.
- BENNETT, L.G.I., LEWIS, B.J., BENNETT, B.H., MCCALL, M.J., BEAN, M., DORÉ, L., GETLEY, I.L. **Cosmic radiation exposure survey of an Air Force Transport Squadron**. Radiation Measurements XXX, p. 1-8, 2012.
- BOEING. Disponível em: <www.boeing.com> Acesso em Abril de 2012.
- BOTTOLLIER, J. F., CHAU, Q., BOUISSET, P., KERLAU, G., PLAWINSKI, L., LEBARON-JACOBS, L. **Assessing exposure to cosmic radiation during long-haul flights**. Radiat Res 153(5 Pt. 1):526-32; 2000.
- BRUM, C. G. M. **Variabilidade da Absorção de ruído cósmico via riômetro e modelagem numérica dos processos associados**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2005.
- BUTIKOFER, R., FLUCKIGER, E.O., DESORGHER, L., MOSER, M.R. **The extreme solar cosmic ray particle event on 20 January 2005 and its influence on the**

**radiation dose rate at aircraft altitude.** Science of the total environment v.391, p. 177–183, 2008.

CARI-6, FAA, **Federal Aviation Administration Office of Aerospace Medicine civil Aerospace Medical Institute.** Disponível em: <<http://jag.cami.jccbi.gov/cariprofile.asp>> Acesso em Agosto de 2012.

CESSNA. Cessna a Textron Company. Disponível em: <[www.cessna.com](http://www.cessna.com)> Acesso em Abril de 2012.

CNEN. Norma NN 3.01: **Diretrizes básicas de proteção radiológica. Comissão Nacional de Energia Nuclear.** Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/mostra-norma.asp?op=301>> Acesso em Setembro de 2012.

CONTI L. F. **Programa de análise estatística e gráfica de dados, WINGRAF.** Instituto de Radioproteção e Dosimetria, IRD/CNEN. Rio de Janeiro, Brazil. 1995.

COPELAND, K., SAUER, H. H., DUKE, F. E., FRIEDBERG, W. **Cosmic radiation exposure of aircraft occupants on simulated high-latitude flights during solar proton events from 1 January 1986 through 1 January 2008.** Advances in Space Research 42, p. 1008–1029, 2008.

CRONIN, J.W., T.K. GAISSER and S.P. SWORDY. **Cosmic rays at the energy frontier.** Scientific American Magazine 276(1), p 32-37, janeiro 1997.

DYERU, C. S., TRUSCOTT, P. R. **Cosmic radiation effects on avionics.** Microprocessors and Microsystems 22, p. 477-483, 1999.

EMBRAER. Embraer for the Journey. Disponível em: <[www.embraer.com](http://www.embraer.com)> Acesso em Abril de 2012.

EURADOS WG 5, Radiation Protection 140 - **Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew.** Final Report of EURADOS WG 5 to the Group of Experts established under Article 31 of the Euratom treaty, 2004.

EURATOM, European Communities. **The basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionising radiation.** Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities; Council Directive 96/29/EURATOM, 1996.

FAA. **CARI6: Radiobiology Research Team.** Federal Aviation Administration. Disponível em: <[http://www.faa.gov/data\\_research/research/med\\_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari6/](http://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari6/)> Acesso em Novembro de 2011.

- FEDERICO, C.A. **Dosimetria da Radiação cósmica no Interior de aeronaves no Espaço Aéreo Brasileiro**. Dissertação de Mestrado IPEN, 2011
- FENG, Y. J., CHEN, W. R., SUN, T. P., DUAN, S. Y., JIA, B. S., ZHANG, H. L. **Estimated cosmic radiation doses for flight personnel**. Space Med Eng 15(4):265-9; 2002.
- FOKKER. Fokker Technologies. Disponível em: <[www.fokker.com](http://www.fokker.com)> Acesso em Abril de 2012.
- FRIEDBERG W et al. **Radiation exposure during air travel: Guidance provided by the FAA for air carrier crews**. Health Phys 79(5):591-5; 2000.
- FUJITAKA, K., OKANO, M., UCHIHORI, Y., KOI, T., KITAMURA, H. **Cosmic radiation at aircraft altitudes calculated by CARI-6 and its comparison with measurements**. ScienceDirect. Radioactivity in the Environment Volume 7, p. 858-862; 2005.
- G1. G1 de São Paulo, 14/10/2011. **Horário de verão começa neste fim de semana**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/brasil/noticia/2011/10/horario-de-verao-comeca-meia-noite-de-domingo.html>> Acesso em Julho de 2012.
- GAISSER, T. K., STANEV, T. **Cosmic Rays**, Bartol Research Inst., Univ. of Delaware, 2007.
- GARTENBACH, K. E., PICKERT, M., ZIMMERMANN M. W., KRANZ, A. R. **Cosmic ionizing radiation effects in plant seeds after short and long duration exposure flights**. Adv. Space Res. Vol. 14, No. 10, p. 105-108, 1994.
- GOOGLE Earth. Disponível em: < <http://www.google.com/earth/index.html> > Acesso em 2012.
- GREEN, A.R., BENNETT, L.G.I., LEWIS, B.J., KITCHING, F., MCCALL, M.J., DESORMEAUX, M., BUTLER, A. **An empirical approach to the measurement of the cosmic radiation field at jet aircraft altitudes**. Advances in Space Research 36, p. 1618–1626, 2005.
- GUIMARÃES, P. V. **Análise da Influência das Interações Primárias em Chuveiros Aéreos Estendidos**. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal Rio de Janeiro, 2008.
- IATA, International Air Transport Association. **Airline and Airport Code Search**. Disponível em: <<http://www.iata.org/publications/Pages/code-search.aspx>> Acesso em Novembro de 2012.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=ce>> Acesso em Outubro de 2012.

ICAO, **International Civil Aviation Organization**. Disponível em <<http://www.icao.int/Pages/default.aspx>> Acesso em Novembro de 2012.

INFRAERO. Disponível em: <[www.infraero.gov.br](http://www.infraero.gov.br)> Acesso em 2012.

LAURIA, D. C., ROCHEDO, E. R. R., GODOY, M. L. D. P., SANTOS, E.E., HACION S. S. **Naturally occurring radionuclides in food and drinking water from a thorium-rich area**. On-line publication by Radiation and Environmental Biophysics, Springer Verlag, 2012.

LET. Let Aircraft Industries. Disponível em: <[www.let.cz](http://www.let.cz)> Acesso em Abril de 2012.

LIN Y., CHEN C., LIN P. **Natural background radiation dose assessment in Taiwan**. Environment International, Volume 22, Supplement 1, p. 45-48. 1996

KENDALL, G.M., **Factors affecting cosmic ray exposures in civil aviation**. International Congress Series 1276, p. 129– 132, 2005.

MARES, V., YASUDA, H. **Aviation route doses calculated with EPCARD.Net and JISCARD EX**. Radiation Measurements 45, p.1553-1556, 2010.

MEIER, M. M., HUBIAK, M. **Measurements of the radiation quality factor Q at aviation altitudes during solar minimum (2006-2008)**. Advances in Space Research 45, p. 1178-1181, 2010.

MENDONÇA, R. R. S., RAULIN, J. P., BERTONI, F. C. P., ECHER, E., MAKHMUTOV, V. S. e FERNANDEZ, G. **Estudo em múltiplas escalas temporais da intensidade de raios cósmicos medida na superfície terrestre**. Revista Brasileira de Geofísica 29, v.4, p.677-690, 2011.

MENDONÇA, R. R. S. **Influência das variabilidades solar, Geomagnética e atmosférica na modulação da intensidade de raios cósmicos**. Dissertação (Mestrado Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial / Ciências do Ambiente Solar – Terrestre) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

O'SULLIVAN, D., ZHOU, D., HEINRICH, W., ROESLER, S., DONNELLY, J., KEEGAN, R., FLOOD, E., TOMMASINO, L. **Cosmic rays and dosimetry at aviation altitudes**. Radiation Measurements 31, p.579-584, 1999

- OKSANEN, P. J. **Estimated individual annual cosmic radiation doses for flight crews.** *Aviat Space Environ Med* 69(7):621-5; 1998.
- PALLE, E., BUTLER, C.J., O'BRIEN K. **The possible connection between ionization in the atmosphere by cosmic rays and low level clouds.** *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 66, 1779–1790, 2004.
- PAN ROTAS: **Revista Pan Rota.** Disponível em: <<http://www.panrotas.com.br>> Acesso em Novembro de 2011.
- PETROV, V. M. **Solar cosmic rays as a specific source of radiation risk during piloted space flight.** *Advances in Space Research* 34 p. 1390–1394, 2004.
- POJE, M., VUKOVIC, B., VARGA, M., RADOLIC, V., MIKLAVCIC, I., FAJ, D., PLANINIC, J. **Relation between galactic and solar cosmic radiation at aviation altitude.** *Advances in Space Research* 42, p. 1913–1916, 2008.
- PUTZE, A. **Propagation of cosmic rays in the Earth's atmosphere. Internship at the LPSC Grenoble Supervised by Laurent Derome,** June 2006 Disponível em: <<http://hal.in2p3.fr/docs/00/10/66/75/PDF/Report.pdf>>. Acesso: Outubro 2012.
- ROCHEDO, E.R.R., ALVES, V. A., PRADO, N. V., LAURIA, D. C., 2012. **Assessing public exposure in commercial flights in Brazil.** Disponível: IRPA 13, Glasgow. IRPA 13. 2012.
- ROCHEDO, P. R. R. **Análise econômica sob incerteza da captura de carbono e termoelétricas a carvão: retrofitting e capture-ready.** Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal Rio de Janeiro, 2011.
- ROMANO, E., FERRUCCI, L., NICOLAI, F., DERME, V., STEFANO, G. F. **Increase of chromosomal aberrations induced by ionizing radiation in peripheral blood lymphocytes of civil aviation pilots and crew members.** *Mutation Research* 377, p. 89–93, 1997.
- SCHLAEPFER, H. **Cosmic Rays.** *Spatium* Published by the Association Pro ISSI twice a year, October 2003.
- SEMYONOV, O. G. **Radiation hazard of relativistic interstellar flight.** *Acta Astronautica* v. 64, p. 644–653, 2009.
- SHEA M.A., SMART D.F. **Cosmic Rays implications for human health.** *Space Science Reviews*,93: 187-205; 2000.
- SILVA, M. R. **Variação da intensidade dos raios cósmicos em respostas a diferentes estruturas magnéticas do meio interplanetário.** Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2008.

- SIINGH, D. **Cosmic Rays and Earth's Atmospheric Processes: A Review.** e-Journal Earth Science India, Vol. I (III),p. 87-101, 2008
- SOHRABI, M. and ESMAILI, A. R. **New public dose assessment of elevated natural radiation areas of Ramsar (Iran) for epidemiological studies.** p. 15-24 in: High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects.. International Congress Series 1225. Elsevier Science B.V., 2002.
- SOUZA, E. M., ROCHEDO, E. R. R., CONTI, L. F. C., WASSERMAN, M. A. V., MELO, V. **Survey on background radiation on Ganabara bay.** Disponível: INAC 2007 - International Nuclear Atlantic Conference. 2007
- SPURNY, F. **Radiation doses at high altitudes and during space flights.** Radiation Physics and Chemistry v.61, p. 301–307, 2001.
- SPURNY, F. **Exposure of aircrew to cosmic radiation. Calculation and experimental approach.** International Congress Series 1225, p.121– 129; 2002.
- TAYLOR, G. C., Ojeh, C. A. **Measurement and calculation of cosmic radiation exposure during a pole-to-pole flight sequence.** Radiation Measurements 45, P. 1589-1592, 2010.
- THIERFELDT, S., HAIDER, C., HANS, P., KALEVE, P., NEUENFELDT, F. **Evaluation of the implementation of radiation protection measures for aircrew.** European Commission Radiation Protection N° 156, Final report of contract TREN/06/NUCL/S07.66018, 2009.
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 1993. **Exposures from natural sources of radiation.** Annex A, 1993.
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000. **Report to the General Assembly, with scientific annexes.** Vol.I, Annex B, 2000.
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008. **Report to the General Assembly, with scientific annexes.** Vol.I, Annex B, 2010.
- USOSKIN, I., DESORGHER, L., VELINOV, P., STORINI, M., FLUCKIGER, E. O., BUTIKOFER. R., KOVALTSOV, G. A. **Solar and galactic cosmic rays in the Earth's atmosphere.** Disponível em: <[http://cc.oulu.fi/~usoskin/personal/COST-724\\_Usoskin.pdf](http://cc.oulu.fi/~usoskin/personal/COST-724_Usoskin.pdf)> Acesso: Outubro 2012.
- VEIGA, L. H. S., KOIFMAN, S., MELO, V. P., SACHET, I., AMARAL, E. C. S. **Preliminary indoor radon risk assessment at the Poços de Caldas Plateau,**

**MG – Brazil.** Disponível: Journal of Environmental Radioactivity 70, p.161–176. 2003

VERGARA, J. C. S., GUIÉRREZ A. M. R., JIMÉNEZ R. R., DOMINGUEZ-MOMPELL R. R., Ortiz, P. G., BARVERÁ, F. M. **Monitoring of the cosmic radiation on IBERIA commercial flights: One year's experience of in-flight measurements.** Radioactivity in the Environment, v.7, p. 885-893, 2005

VUKOVIC, B., LISJAKB, I., RADOLIC, V., VEKIC, B., PLANININ, J. **Measurements of the dose due to cosmic rays in aircraft.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 562, p. 517–520, 2006.

VUKOVIC, B., RADOLIC, V., LISJAK, I., VEKIC, B., POJE, M., PLANINIC, J. **Some cosmic radiation dose measurements aboard flights connecting Zagreb Airport.** Applied Radiation and Isotopes 66, p. 247-251, 2008.

WANG, Z. **Natural radiation environment in China.** p. 39-46 in: High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects. International Congress Series 1225. Elsevier Science B.V., 2002.

WATERS, M., BLOOM, T. F., GRAJEWSKI, B. W. M. **The National Institute for Occupational Safety and Health/Federal Aviation Administration (NIOSH/FAA) working women's health study: Evaluation of the cosmic-radiation exposures of flight attendants.** Health Physics 79, v.5, p.553-559, 2000.

WATSON, S.J., JONES, A.L., OATWAT, W.B., HUGHES, J. S. **Ionizing radiation exposure of the UK population – 2005 review.** Report HPA-RDP-001, 2005.

ZHOU, D., O'SULLIVAN, D., FLOOD, E. **Radiation field of cosmic rays measured at aviation altitudes by CR-39 detectors.** Advances in Space Research 37, p. 1218–1222, 2006.

## ANEXO

Apresenta os resumos dos trabalhos apresentados em congressos durante o desenvolvimento desta dissertação. Todos os congressos incluem a publicação de resumos e de trabalhos completos.

*13th International Congress of the International Radiation Protection Association  
IRPA-13 / Glasgow. 13-18 May 2012*

## **ASSESSING PUBLIC EXPOSURE IN COMMERCIAL FLIGHTS IN BRAZIL**

Rochedo, E.R.R.<sup>1,2</sup>; Alves, V.A.<sup>1</sup>; Prado, N.M.<sup>1</sup>; Lauria, D.C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IME - Instituto Militar de Engenharia, Pç. Gen. Tiburcio, 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, 22290-270, RJ, Brazil

<sup>2</sup> IRD/CNEN – Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Av.Salvador Allende S/No., Jacarepagua, Rio de Janeiro, 22780-160, RJ, Brazil

The exposure to cosmic radiation in aircraft travel is higher than that at ground level and may vary with the route due to the effect of latitude, with the flight altitude, the flight length, and the year due to the cyclic variation observed in earth's flux of cosmic rays. The computer program CARI-6, developed by the U.S. Federal Aviation Administration Civil Aerospace Medical Institute, calculates the effective dose of galactic cosmic radiation received by an individual (based on an anthropomorphic phantom) in an aircraft flying the shortest route between two airports the world. The program takes into account changes in altitude and geographic location during the course of a flight, as derived from the flight profile entered by the user. Although originally developed to quantify the radiation exposure of flight crews, the code performs the dose calculation for a particular flight data provided by the user. Although, for the general public, this exposure is not subject to regulation, because it is a voluntary activity, commercial flights represent a technological increased exposure of people to natural radiation. The aim of this work is to estimate the contribution of cosmic radiation exposure on commercial flights to the Brazilian population. The work shall serve as a baseline for future comparisons of the growth of civil aviation in the country. It shall also open perspectives for discussions on the concept of risk and its public acceptance, relevant to the establishment of radiological protection guidelines. At this first stage, a preliminary study was performed to verify the relevance of the information needed to perform the simulations using CARI-6 code. It was verified that most relevant parameters are the time of flight, the average flight altitude (CV ~ 25%) and latitude (CV ~ 4 %) in domestic flights in Brazil.

## **ASSESSING PUBLIC EXPOSURE IN COMMERCIAL FLIGHTS IN BRAZIL**

V.A. Alves\*, E.R.R. Rochedo, N.M.P.D Prado

*Instituto Militar de Engenharia; Pç. Gen. Tiburcio, 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, 22290-270, RJ, Brazil;*

**Abstract:** The exposure to cosmic radiation in aircraft travel is significantly higher than at ground level and varies with the route due to the effect of latitude, the altitude of flight, the flight time, and the year according to the solar cycle effects in galactic cosmic ray flux. The computer program CARI-6, developed by the U.S. Federal Aviation Administration, calculates the effective dose of galactic cosmic radiation received by an individual in an aircraft flying the shortest route between two airports of the world. The program takes into account changes in altitude and geographic location during the course of a flight. The aim of this project is to estimate the contribution of cosmic radiation exposure on commercial flights to the Brazilian population. A database, including about 4000 domestic flights in Brazil, was implemented in Excel spreadsheets based on data flights information for November 2011. Main fields included on the database are the origin and destination of flights, time of departure and arrival, plane type, number of passengers, flight times (take-off, landing and cruise altitude times) and number of flights per year. This information will be used to estimate individual and collective doses. This work should serve as a baseline for future comparisons of exposure due to the growth of civil aviation in the country. The relevance of any study on exposure to natural radioactivity and its technological increases, particularly in this case, in which exposure is considered voluntary, should open perspectives to discussions on the concept of risk and its public acceptance, which are relevant aspects to consider when defining radiological protection guidelines.

Keywords: public exposure, cosmic radiation, domestic flights

## ***PUBLIC EXPOSURE IN COMMERCIAL NATIONAL FLIGHTS TO AND FROM RIO DE JANEIRO, BRAZIL***

**Vanusa A. Alves, Elaine R. R. Rochedo and Nadya M. P. D. Ferreira**

<sup>1</sup> Instituto Militar de Engenharia (IME)  
Pç. Gen. Tiburcio, nº 80 - Praia Vermelha,  
22290-270 Rio de Janeiro, RJ

The exposure to cosmic radiation in aircraft travel is significantly higher than at ground level and varies with the route due to the effect of latitude, the altitude of flight, the flight time, and the year according to the solar cycle effects in galactic cosmic ray flux. A database, including about 4000 domestic flights in Brazil, was implemented in Excel spreadsheets based on data flights for November 2011. The fields included on the database are the origin and destination of flights, time of departure and arrival, plane type, number of passengers, airline and total time of flight. In this work, doses from flights to and from the town of Rio de Janeiro within Brazil have been assessed using the computer program CARI-6, developed by the U.S. Federal Aviation Administration, that calculates the effective dose of galactic cosmic radiation received by an individual in an aircraft flying the shortest route between two airports of the world. Average effective doses for individual flights ranged from 0.2 to 8.8  $\mu\text{Sv}$ . This is a very small contribution to average overall exposure to natural background radiation (2.4 mSv/y). A frequent flyer with weekly flights on the most usual route, Rio-São Paulo, would receive about 0.18 mSv/y, which means about 7,5 % increase to its usual exposure to natural radiation sources. Collective dose to passengers due to all national flights to and from Rio de Janeiro was estimated to be about 100 manSv per year.