

Universidade Federal de Santa Catarina

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção

**MÉTODO ESTATÍSTICO NO AUXÍLIO À
PREVISÃO DE NEVOEIRO PARA O
AERÓDROMO DE GUARULHOS**

Dissertação de Mestrado

Gaspar Antonio de Oliveira

Florianópolis

2002

**MÉTODO ESTATÍSTICO NO AUXÍLIO À
PREVISÃO DE NEVOEIRO PARA O
AERÓDROMO DE GUARULHOS**

Universidade Federal de Santa Catarina

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção

**MÉTODO ESTATÍSTICO NO AUXÍLIO À
PREVISÃO DE NEVOEIRO PARA O
AERÓDROMO DE GUARULHOS**

Gaspar Antonio de Oliveira

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção da
Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em
Engenharia de Produção

Florianópolis

2002

Gaspar Antonio de Oliveira

**MÉTODO ESTATÍSTICO NO AUXÍLIO À
PREVISÃO DE NEVOEIRO PARA O
AERÓDROMO DE GUARULHOS**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Produção no
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 18 de Fevereiro de 2002.

Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph.D.
Coordenador do Curso.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Robert Wayne Samohyl, Ph.D.
Orientador

Prof. José Leomar Todesco, Dr.

Prof. Roberto Meurer, Dr.

A Deus, por ter guiado meus caminhos.
À minha esposa, pelo amor e compreensão.
Aos meus filhos,
muito especialmente à Maria Cristina e ao William David,
pelas suas permanentes disponibilidades.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Santa Catarina.
À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.
Ao orientador Prof. Robert Wayne Samohyl, por ter estimulado à execução do trabalho, e ter feito a sua depuração, tornando-o mais sintético e objetivo, e ainda, por ter-me apoiado à prorrogação do mestrado em decorrência de meu estado de saúde.

Aos Professores José Leomar Todesco e Roberto Meurer, pelas críticas, correções importantes, detalhadas e essenciais à consecução da dissertação.

Ao Doutorando em Geografia Física pela USP, Sr. Edson Cabral, por ter-me disponibilizado artigos de sua especialização sobre Climatização de Nevoeiros.

Aos demais Professores do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSC pelos ensinamentos e receptividade.

A todos os colegas pelo convívio, camaradagem, apoio e cooperação durante o curso.

A todos o meu sincero obrigado!

“Instruir-te-ei e te ensinarei o caminho que deves seguir,
e sob as minhas vistas, te darei conselho.”

“Aplica o coração ao ensino e
os ouvidos às palavras do conhecimento.”

Salmo 32:8 e Provérbios 23:12

Sumário

Lista de figuras-----	ix
Lista de tabelas-----	x
Lista de reduções-----	xi
Resumo-----	xii
Abstract-----	xiv
1 INTRODUÇÃO-----	1
1.1 O Problema do Nevoeiro nas Atividades Aeronáuticas-----	1
1.2 A Problemática-----	2
1.3 Hipóteses-----	3
1.4 Objetivos-----	4
1.4.1 Geral-----	4
1.4.2 Específicos-----	4
1.5 Delimitação da Pesquisa-----	5
1.6 Justificativa-----	5
1.7 Estrutura do Trabalho-----	6
2 O NEVOEIRO-----	8
2.1 Conceito e Tipos de Nevoeiro-----	8
2.2 Umidade do Ar-----	9
2.3 Parâmetros Definidores do Teor de Umidade do Ar-----	12
2.4 Sondagem Aerológica-----	13
2.5 Processo Gráfico para Obtenção de Parâmetros-----	19
2.5.1 Razão de mistura-----	20
2.5.2 Razão de mistura saturada-----	21
2.5.3 Umidade relativa-----	22
2.5.4 Pressão de vapor-----	22
2.5.5 Pressão de vapor saturado-----	24
2.5.6 Nível de condensação por levantamento-----	24
2.6 Climatologia da Cidade de São Paulo-----	25

2.7 Climatologia dos Nevoeiros no Aeródromo de Guarulhos	29
2.8 Regressão Linear Múltipla	37
2.8.1 Estimação dos parâmetros	38
2.8.2 Estudo das variações residuais	41
2.8.3 Coeficiente de explicação ou de determinação múltipla	44
2.8.4 Estimador de variância	45
2.8.5 Teste de hipótese para a existência de regressão linear múltipla	46
2.8.6 Teste de hipótese dos parâmetros β_i	47
2.8.7 Construção de intervalo de confiança para o coeficiente β_i	49
2.8.8 Intervalo de confiança para $E(Y_h)$	50
3 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NAS ATIVIDADES AERONÁUTICAS	54
3.1 A Constituição das Mensagens METAR e TEMP	54
3.2 Rotinas de Previsão de Eventos Meteorológicos	59
3.2.1 Seleção do evento de tempo significativo para previsão	60
3.2.2 Estabelecimento do período de previsão e da hora-limite	60
3.2.3 Estabelecimento do problema da previsão em termos precisos	60
3.2.4 Relação dos prováveis preditores de tempo	61
3.2.5 Coleta e análise dos dados pertinentes	64
4 MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS	65
4.1 Base de Dados Utilizada	65
4.2 Método Estatístico Aplicado	66
4.2.1 Equações estimadas e coeficientes de determinação	66
4.2.2 Teste de hipótese para existência de Regressão Linear Múltipla	67
4.2.3 Testes de hipótese dos parâmetros β_i	68
4.2.4 Intervalos de confiança para os coeficientes β_i	70
4.2.5 Intervalo de confiança para $E(Y_h)$	70
4.3 Método Meteorológico Aplicado	72
4.3.1 Seleção do evento de tempo significativo para previsão	72
4.3.2 Estabelecimento do período de previsão e da hora-limite	73
4.3.3 Estabelecimento do problema de previsão em termos precisos	73
4.3.4 Relação dos preditores	73
5 RESULTADOS	76
5.1 Análise Estatística	76
5.2 Análise Meteorológica	77
5.2.1 Fluxo de decisão para previsão de nevoeiro	78
5.2.2 Escores de resultados da previsão de nevoeiro de radiação	82
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
6.1 Conclusões	84

6.2 Recomendações	85
7 FONTES BIBLIOGRÁFICAS	88
8 ANEXOS	91
8.1 Mensagem TEMP	91
8.2 Equações de Regressão	92
8.3 Algoritmo para Multiplicação das Matrizes de Valores das Variáveis Independentes	101
8.4 Algoritmo para Obtenção da Matriz Inversa e Intervalo de Confiança de $E(Y_n)$	104

Lista de figuras

Figura 1:	Curva de saturação do vapor d'água	p. 11
Figura 2:	Isóbaras na "Carta Skew T Log P"	p. 15
Figura 3:	Isotermas na "Carta Skew T Log P"	p. 16
Figura 4:	Adiabáticas Secas na "Carta Skew T Log P"	p. 17
Figura 5:	Adiabáticas Saturadas na Carta "Skew T Log P"	p. 18
Figura 6:	Linhas de razão saturada na "Carta Skew T Log P"	p. 19
Figura 7:	Parte de uma sondagem aerológica na "Carta Skew T Log P"	p. 21
Figura 8:	Determinação de pressão de vapor (e) e da pressão de vapor saturado (e_s)	p. 23
Figura 9:	Localização do nível de condensação por levantamento (NCL)	p. 25
Figura 10:	Pressão atmosférica	p. 26
Figura 11:	Precipitação (mm)	p. 26
Figura 12:	Temperatura média (°C)	p. 27
Figura 13:	Temperatura mínima (°C)	p. 27
Figura 14:	Umidade do ar (%)	p. 28
Figura 15:	Insolação (H)	p. 28
Figura 16:	Nebulosidade (décimo)	p. 29
Figura 17:	Gráfico das horas anuais de nevoeiro das Estações Meteorológicas de Cumbica e de Guarulhos	p. 31
Figura 18:	Gráfico comparativo de horas de nevoeiro Guarulhos x Congonhas	p. 32
Figura 19:	Gráfico da frequência de dias anuais de nevoeiro das estações meteorológicas de Cumbica e de Guarulhos	p. 33
Figura 20:	Gráfico das frequências médias mensais de horas de nevoeiro de Guarulhos e Congonhas	p. 34
Figura 21:	Gráfico dos horários de início de nevoeiro no aeródromo de Guarulhos	p. 35
Figura 22:	Gráfico de frequência de duração do nevoeiro no Aeródromo de Guarulhos	p. 36
Figura 23:	Fluxo de decisão para previsão de nevoeiro de radiação	p. 79

Lista de tabelas

Tabela 1:	Quadro de Análise de Variâncias	p. 46
Tabela 2:	Modelo de Tabela de Contingência	p. 52
Tabela 3:	Parâmetros da mensagem METAR	p. 55
Tabela 4:	Parâmetros de FSI e MIXR	p. 69
Tabela 5:	Parâmetros de Q_HZBR e Q_CLR	p. 69
Tabela 6:	Parâmetros de Q_HZBR e DPPO	p. 69
Tabela 7:	Intervalos de FSI e MIXR	p. 70
Tabela 8:	Intervalos de Q_HZBR e Q_CLR	p. 70
Tabela 9:	Intervalos de Q_HZBR e DPPO	p. 70
Tabela 10:	Escores de Resultados na Tabela de Contingência	p. 82

Lista de reduções

Siglas

CAVOK	Ceiling and visibility ok
FSI	Fog stability index (índice de estabilidade de nevoeiro)
GMT	Greenwich Mean Time(Tempo médio de Greenwich). A hora de Brasília acrescida de 3 horas (acrescida de 2 horas no horário de verão) corresponde a hora GMT.
hPa	Hectopascal ou milibares (mb). Unidade de pressão barométrica em uso na meteorologia.
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia.
KT	Knot (Nó). Unidade de velocidade adotada na Meteorologia Aeronáutica. Equivale a 0,514791m/s.
NCL	Nível de condensação por levantamento. Se a parcela de ar sobe suficientemente, seu resfriamento pode causar condensação. O nível em que isto ocorre é o nível de condensação por levantamento.
METAR	Meteorological Aerodrome Reports. Mensagem Meteorológica Aeronáutica que contém informações resultantes de uma observação meteorológica de superfície de um aeródromo.
OACI	Organização de Aeronáutica Civil Internacional.
OMM	Organização Mundial de Meteorologia.
SKEW T LOG P	Diagrama termodinâmico de plotagem de uma sondagem aerológica.
TEMP	Mensagem que contém informações relativas de uma sondagem aerológica de um determinado local.
UTC	Coordenada de tempo universal (comumente conhecido por Z ou zulu). Corresponde à hora de Brasília + 3 horas. No horário de verão, corresponde à hora de Brasília + 2 horas.
ILS	Instrument Landing System (Sistema de Pouso por Instrumento)
RVR	Runway Visual Range (Alcance visual da pista)

Resumo

OLIVEIRA, Gaspar Antonio de. **Método Estatístico no Auxílio à Previsão de Nevoeiro para o Aeródromo de Guarulhos**. 2002. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.

Na área da proteção ao voo, a presença de nevoeiro ainda tem sido um óbice para as operações de pouso e decolagem de aeronaves. A previsão de ocorrência de nevoeiro é importante para o planejamento de voo e para as operações diárias de qualquer serviço de proteção ao voo. Este trabalho tem como principal objetivo selecionar, estudar e definir um método estatístico auxiliar para prever a ameaça de nevoeiro de radiação, no Aeródromo de Guarulhos, entre o período de Maio a Agosto.

O estudo baseia-se no emprego de Regressão Linear Múltipla, correlacionando a visibilidade com outros parâmetros meteorológicos e o Índice de Estabilidade de Nevoeiro (FSI – Fog Stability Index) usado em centros meteorológicos dos Estados Unidos, Hungria e Itália. O modelo de regressão linear múltipla baseia-se no Método dos Mínimos Quadrados.

A função de regressão amostral escolhida, mediante teste de hipótese para a existência de regressão linear múltipla, quando aplicada em quatro meses de observações meteorológicas do Aeródromo de Guarulhos, surtiu ótimo

resultado em termos de previsão da visibilidade horizontal da pista, perfazendo um total de 80% de acertos.

Palavra-chave: Nevoeiro de radiação, visibilidade horizontal, regressão linear múltipla, coeficiente de determinação múltipla.

Abstract

OLIVEIRA, Gaspar Antonio de. **Método Estatístico no Auxílio à Previsão de Nevoeiro para o Aeródromo de Guarulhos**. 2002. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.

In the area of flight protection, the presence of a fog is still been a impediment to landing and take-off operations. The forecast for occurrence of fog is important for flight planning and for daily operations of any important service of flight protection. This work, has as its man goal, to select, to study and to define a auxiliary statistic method to forecast a threat of radiation fog at the Guarulhos Airport, from May to August.

This study is based on the employment of “Multiple Linear Regression” correlated the visibility and other meteorological parameters and the Fog Stability Index (FSI) used in meteorological centers in the USA, Hungary and Italy. The Multiple Linear Regression method is based on the “Minimum Squares Method”.

The function of the regression sample chosen, through hypothetical test for the existing of multiple linear regression, when applied for four months of meteorological observations of the Guarulhos Airport, brought excellent results

in terms of horizontal visibility forecast for the runway, making up 80% of accuracy.

Keyword: Radiation Fog, Horizontal Visibility, Multiple Linear Regression, Coefficient of Multiple Determination.

1 INTRODUÇÃO

1.1 O Problema do Nevoeiro nas Atividades Aeronáuticas

A realização de um voo seja no ambiente civil ou no militar, inclui o desenvolvimento de inúmeras atividades com acentuada antecedência: manutenção, escalção de tripulantes, abastecimento de aeronaves, controle de passageiros e cargas, controle de tráfego aéreo, até o acompanhamento contínuo das condições meteorológicas reinantes e previstas dos aeródromos. Tratam-se de atividades dinâmicas, interdependentes e decisivas, não podendo, por isso, admitir-se qualquer nível de falhas.

A evolução tecnológica no meio aeronáutico em relação a essas atividades cresce a cada dia, causando modificações nos procedimentos rotineiros de trabalho e exigindo, conseqüentemente, a elaboração de minuciosos planejamentos operacionais de voo, tanto no atendimento a vôos domésticos, como a internacionais. Nele destaca-se a importância do prognóstico de nevoeiro em um aeródromo, haja vista seu conteúdo proporcionar modificações gerais no planejamento de voo, inclusive em questões relativas à segurança.

Nesse sentido, a rápida modernização dos meios de comunicação e da informática torna possível explorar, concentrar, tratar e difundir informações meteorológicas que possam contribuir, significativamente, para a elaboração de prognósticos de nevoeiro em aeródromos, especialmente nos que têm um trânsito intenso como o de Guarulhos, em São Paulo, cuja freqüência de pousos e decolagens é uma das maiores na América do Sul.

1.2 A Problemática

O nevoeiro, a névoa e os “stratus” baixos sempre representam perigo à aviação. O “vôo por instrumentos”, o apoio do rádio e do radar são recursos técnicos que possibilitam, em grande parte, a solução das dificuldades de vôo entre aeroportos distantes. Os vários métodos desenvolvidos permitem o pouso com nuvens muito baixas e visibilidade horizontal restrita ou mesmo quase nula.

Porém, além de sua implementação requerer a utilização de equipamentos especiais, em momentos críticos podem ocorrer imprevistos que inviabilizam seu emprego, permanecendo, então, o perigo. Nesses casos, substitui-se a sistemática metodológica por procedimentos mais prudentes, como, por exemplo, evitar pouso onde as nuvens e a visibilidade estiverem abaixo dos limites de segurança. Porém, mesmo com essa solução alternativa, previsões mais aprimoradas das condições meteorológicas constituem um fator imprescindível às atividades aeronáuticas, significando que delas dependem não o sucesso dos pousos e decolagens, mas a definição dos procedimentos que determinam esse sucesso.

No contexto dos problemas que mais implicam cuidados aos pousos e decolagens estão o nevoeiro, que reduz a capacidade de visibilidade horizontal do local de pouso, contribuindo muito para a ocorrência de acidentes. Tais ocorrências acarretam alterações em planejamentos de vôos das empresas aéreas, prejuízos aos passageiros, excessiva ocupação dos pátios dos aeródromos alternativos, despesas extras com hotéis e combustível e, entre

outras, uma sobrecarga operacional para os serviços do Sistema de Proteção ao Voo dos aeródromos alternativos. Aduz-se a isso, a necessidade de uma vigilância mais acurada e atenção redobrada da equipe de serviço do Centro de Controle de Aproximação da Área Terminal de São Paulo. Atualmente, o Sistema de Proteção ao Voo conta com o auxílio de fotos de satélites geoestacionários que fornecem detalhes sobre a presença de nevoeiro em uma determinada região, num dado momento.

Entendendo-se que a disponibilidade de informações sobre as possibilidades de nevoeiro com mais antecedência poderia minimizar a sobrecarga dele decorrente, pergunta-se:

Poderia algum método estatístico auxiliar na previsão de formação de nevoeiro para o Aeródromo de Guarulhos?

O estudo a ser desenvolvido leva a uma abordagem interdisciplinar do problema, na medida em que requer conhecimentos razoáveis de meteorologia, de informática e de estatística.

1.3 Hipóteses

- Recursos estatísticos baseados em estudos de regressão linear múltipla podem desenvolver um prognóstico de nevoeiro para pistas do Aeródromo de Guarulhos;
- Os recursos estatísticos não se adequaram ao prognóstico proposto.

1.4 Objetivos

1.4.1 Geral

Identificar e definir um método estatístico baseado em regressão linear múltipla capaz de auxiliar na previsão de formação de nevoeiro no Aeródromo de Guarulhos.

1.4.2 Específicos

- Analisar os resultados climatológicos da cidade de São Paulo;
- Analisar a climatologia de nevoeiro para identificar o período de maior incidência do nevoeiro de radiação;
- Descrever as características dos diferentes tipos de nevoeiro;
- Descrever as mensagens, fontes de informação e parâmetros ao estudo das condições do nevoeiro;
- Identificar coeficientes estatísticos de determinação múltipla e as respectivas equações de regressão linear múltipla;
- Estudar dados meteorológicos extraídos de mensagens meteorológicas do Aeródromo de Guarulhos, visando à aplicação do método estatístico proposto;
- Analisar os resultados mediante o emprego de escore de resultado em uma tabela de contingência que aponte os acertos e erros dos

resultados previstos, diante das ocorrências reais registradas nas mensagens meteorológicas.

1.5 Delimitação da Pesquisa

O método estatístico proposto, se validado, limitar-se-á ao Aeródromo de Guarulhos, pois será desenvolvido em atendimento às especificidades de seus fatores meteorológicos.

1.6 Justificativa

A pesquisa, com o emprego da Estatística, é relevante por vários aspectos: primeiramente, trata-se de uma tentativa pioneira em relação ao assunto e tem por lastro a perspectiva da prevenção. Depois, a abordagem interdisciplinar reflete sua atualidade. Trata-se de uma visão que possibilita a ampliação das questões relativas ao problema e, aplicada ao objetivo da pesquisa, poderá trazer uma nova perspectiva de solução para a sobrecarga geral decorrente do nevoeiro, através de uma reestruturação dos respectivos planejamentos de vôo. A utilização de recursos da Estatística vem contribuir para isso, já que a segurança de seus métodos pode levar a resultados confiáveis. O índice FSI – “Fog Stability Index” a ser utilizado neste estudo, por exemplo, tem sido amplamente utilizado na Europa nas previsões de nevoeiro em aeroportos, apresentando resultados satisfatórios.

Além disso, o trabalho pode representar um ponto de partida para futuras pesquisas na área, podendo, também, ser objeto de análise para uma posterior implementação, caso se confirme sua hipótese positiva ajustada às necessidades operacionais do Centro Meteorológico do Serviço Regional de Proteção ao Vôo de São Paulo.

1.7 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho de pesquisa foi estruturado em seis capítulos descritos brevemente a seguir.

No capítulo 1 consta de uma descrição da importância do prognóstico de nevoeiro para a aviação e dos problemas advindos da presença de nevoeiro para as operações de pouso e decolagem.

No capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica dos principais conceitos meteorológicos, estatísticos e climatológicos envolvidos na pesquisa.

No capítulo 3 são citadas as variáveis meteorológicas inerentes às atividades aeronáuticas e a constituição das mensagens que reportam as condições meteorológicas horárias dos aeródromos, as quais são as fontes de dados para a pesquisa e ainda é apresentada uma rotina que abaliza os passos para previsão de eventos meteorológicos.

No capítulo 4 são expostos os métodos estatístico e meteorológico aplicados, essenciais à escolha da função de regressão amostral, adequada à previsão de nevoeiro de radiação para o Aeródromo de Guarulhos.

No capítulo 5 constam os resultados das análises estatística e meteorológica, visando definir a equação mais apropriada ao estudo, bem como submetê-la a testes de decisão para obtenção de escores de resultados.

O capítulo 6 é dedicado à conclusão e recomendações resultantes da realização da pesquisa, no qual se apresentam sugestões para pesquisas de previsão de nevoeiro com o emprego da inteligência artificial.

2 O NEVOEIRO

2.1 Conceito e Tipos de Nevoeiro

O nevoeiro pode originar uma condição de visibilidade muito diminuta, causada por partículas microscópicas de água líquida, densamente em suspensão na atmosfera junto ao solo (Tubelis e Nascimento, 1980).

Os nevoeiros se formam quando a massa de ar se torna saturada de vapor d'água. O surgimento de um nevoeiro pode ocorrer quando o ar saturado por resfriamento se eleva ao longo de uma encosta, expandindo-se adiabaticamente, isto é, não recebe e nem libera calor com o ar de sua vizinhança. Nestas condições é denominado de nevoeiro orográfico e pode ocorrer em qualquer época do ano.

Os nevoeiros de radiação e de advecção são formados pelo resfriamento da massa de ar, provocada pela condução de calor do ar para a superfície, tornando-se mais frio que a camada atmosférica imediatamente acima. O nevoeiro de radiação ocorre em noites de céu claro ou com a presença somente de nuvens altas, acima de 5000 metros e com vento de superfície predominantemente calmo e quando ele atua, a sua velocidade é inferior a 1 nó, isto é, aproximadamente de 2 Km/h de intensidade.

O nevoeiro de advecção ocorre quando uma massa de ar quente e úmida se desloca sobre uma massa de ar mais fria.

Outro tipo de nevoeiro é o frontal que acontece quando a precipitação, caindo através de uma massa de ar provoca a sua saturação. Esse tipo de

nevoeiro pode estar associado a uma precipitação frontal. O ar na região de precipitação torna-se saturado, de modo que uma pequena queda de temperatura é suficiente para produzir nevoeiro. Admite-se, em geral, que existe na superfície frontal superior uma regular inversão de temperatura e que a chuva que cai é mais quente do que o ar inferior, o que tende a produzir supersaturação de vapor d'água. Diz-se que está se processando uma inversão de temperatura quando ela passa a aumentar com a altura, inversamente ao que ocorre em condições normais. A dissipação do nevoeiro pode se dar pela radiação solar que aquece a superfície e o ar, promovendo a evaporação das gotículas de água. Enquanto esse processo ocorre, o nevoeiro eleva-se da superfície, dando origem a uma nuvem "stratus", que é uma camada nebulosa, baixa e cinzenta e tem a base a cerca de 400 m ou menos.

O tempo necessário para a dissipação depende da espessura dos nevoeiros e da altura da camada de inversão da temperatura.

Como se pode observar, a formação dos nevoeiros se dá a partir da saturação da massa de ar pelo vapor d'água, do que se depreende a importância da umidade do ar no processo.

2.2 Umidade do Ar

O vapor d'água obtido pela evaporação da água do solo e das superfícies líquidas não é estático, está constantemente levado pelas correntes aéreas e mediante condições favoráveis volta ao estado sólido ou líquido. A

concentração do vapor d'água na atmosfera é muito variável, tanto no espaço quanto no tempo (Silva, 2000).

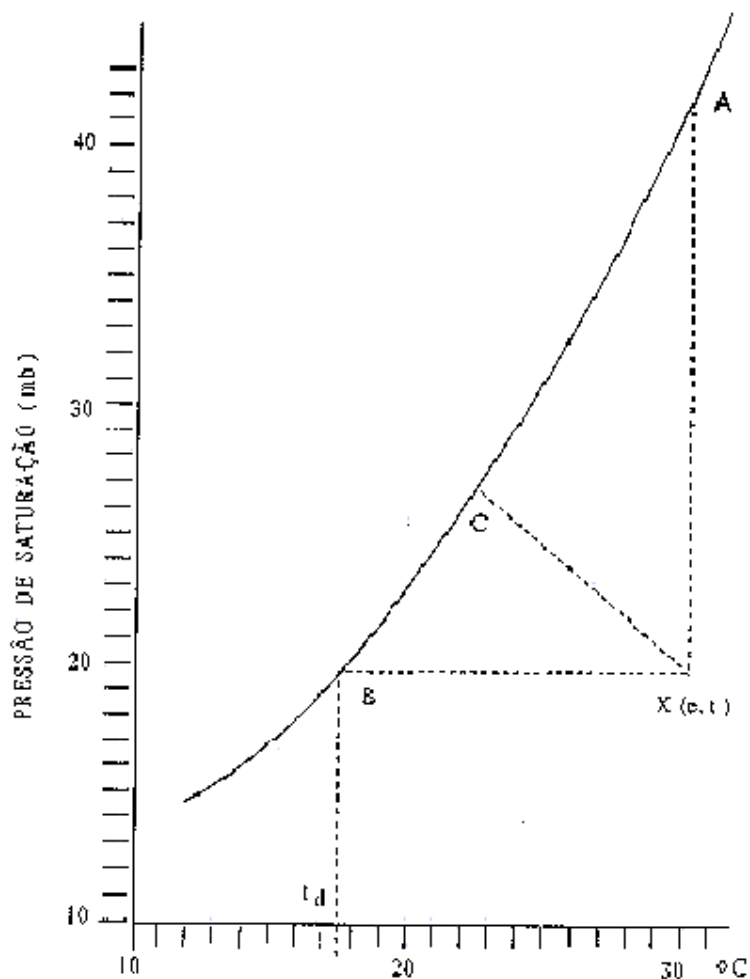
Um ambiente é dito saturado a uma determinada temperatura quando possuir a quantidade máxima possível de vapor d'água àquela temperatura; nessas condições, a pressão de vapor se torna saturada. Para cada temperatura, encontra-se um único valor de pressão de vapor de saturação. A pressão de saturação depende exclusivamente da temperatura ambiente (t).

Várias equações foram desenvolvidas para calcular a pressão de saturação do vapor (e_s). Segundo Pinto (2000, p. 156),

“a mais usada delas foi obtida a partir de resultados experimentais, por O. Tetens em 1930, onde $e_s = 6,178 \exp [17,2693882t / (t+237,3)]$. Esta equação é válida na faixa de -50°C a 100°C e fornece a pressão de saturação sobre a água em milibares (mb), quando a temperatura ambiente (t) for expressa em graus centígrados. Usou-se a notação $\exp(x)$ para indicar e^x , sendo $e = 2,71828$ a base dos logaritmos naturais”.

De posse dos valores de pressão de saturação obtidos, pode-se traçar a curva de saturação. A pressão de saturação do vapor aumenta com a temperatura, embora não linearmente, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1: Curva de saturação do vapor d'água.



Fonte: VAREJÃO-SILVA, M. "Meteorologia e Climatologia". 2001, p. 161.

O ponto X (e,t) representa uma amostra de ar úmido; A, B e C são três diferentes modos de se obter sua saturação, onde t_d é a temperatura do ponto de orvalho quando o ar, a pressão constante, torna-se saturado.

Quando a tensão de vapor é igual a zero, o ar está seco; se a pressão de vapor for igual à pressão de vapor de saturação, o ar encontra-se saturado de água. A saturação de uma amostra de ar úmido pode ser atingida por um dos seguintes processos:

- a) acréscimo de vapor d'água à temperatura constante, até que a pressão parcial (e) atinja o valor máximo possível àquela temperatura;
- b) redução da temperatura, sem acrescentar vapor d'água, até o ponto em que a pressão parcial (e) torne-se saturante;
- c) combinação simultânea dos processos anteriores.

Esses procedimentos podem ser analisados, utilizando-se a curva de saturação. O primeiro deles é representado pelo segmento de reta entre os pontos X (e, t) e o ponto A, já que o valor da pressão parcial (e) aumenta isotermicamente. O segundo processo corresponde ao segmento de reta de X (e, t) até o ponto B, indicando um resfriamento isobárico (sem alteração do valor da pressão parcial de vapor) até atingir a curva de saturação. Nesse caso, o valor da pressão parcial não muda, apenas busca-se a temperatura do ponto de orvalho (t_d) para a qual esse mesmo valor torna-se saturante. Outra evolução que unisse o ponto X (e, t) a qualquer outro ponto C da curva, situada entre A e B, estaria representando um processo combinado, isto é, resfriamento e umidificação simultâneos.

Os parâmetros que definem o teor de umidade do ar são a razão de mistura e a umidade relativa do ar.

2.3 Parâmetros Definidores do Teor de Umidade do Ar

Além da pressão parcial de vapor, existem outras variáveis para quantificar o teor de vapor d'água presente no ar. Dentre elas, a “razão de mistura” e a “umidade relativa” são as mais empregadas.

A razão de mistura do ar úmido, submetido a uma dada pressão atmosférica e a uma determinada temperatura, é o quociente entre a massa de vapor (usualmente em gramas) e a massa de ar seco (usualmente em kg) na qual o vapor está contido e a umidade relativa do ar úmido, submetido a uma determinada temperatura e pressão, é a relação percentual entre o vapor d'água contido no ar e o vapor que o mesmo ar poderia conter se estivesse saturado, a idênticas temperatura e pressão. Normalmente a umidade relativa é expressa em porcentagem e atinge 100% quando o ar está saturado.

Quanto aos parâmetros de estudo para o nevoeiro, sua maioria é obtida por meio de sondagens aerológicas. São elas que proporcionam as informações necessárias à identificação das características dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera.

2.4 Sondagem Aerológica

As sondagens aerológicas têm por finalidade obter informações sobre a distribuição vertical da pressão, sobre a temperatura, a umidade e vento – tanto direção quanto velocidade – visando ao estudo das propriedades físicas da atmosfera em seus aspectos dinâmicos, incluindo o estudo do nevoeiro. As informações são obtidas mediante a utilização de “radiossondas”, que são pequenos transmissores de rádio, dotados de sensores de pressão, de temperatura e de umidade. Eles são lançados na atmosfera por meio de um balão de borracha inflado com gás (hidrogênio ou hélio), chegando a alcançar cerca de 30 km de altitude. O limite é determinado pela ruptura do balão.

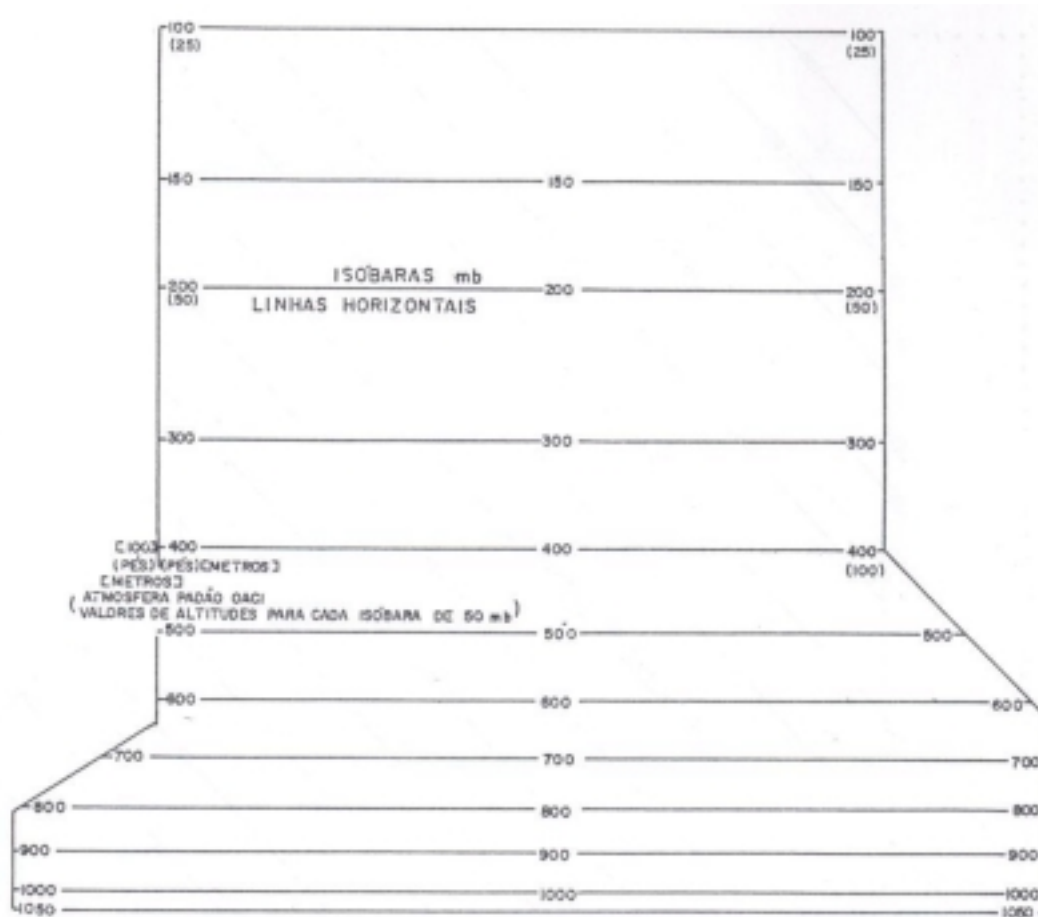
Com relação aos sensores, eles emitem sinais de rádio que se alteram em função da pressão, da temperatura e da umidade relativa reinantes em uma determinada altura. A recepção dos sinais emitidos são recebidos no solo por um receptor que os converte em valores de pressão, temperatura e umidade observados (Pinto, 2000).

Atualmente há “software” apropriado para atender à análise de perfis aerológicos. Para plotar os dados recebidos do radiossonda e efetuar a análise gráfica, utilizam-se diagramas aerológicos impressos. Um dos mais utilizados no Serviço Meteorológico Aeronáutico é o diagrama “Skew T Log P”, por ser o de mais fácil uso nos vários procedimentos e computações meteorológicas.

O diagrama “Skew T Log P” é utilizado no Brasil desde 1969. É composto de isóbaras, isotermas, adiabáticas secas, adiabáticas saturadas e linhas de razão de mistura saturada.

As isóbaras na carta “Skew T Log P” são representadas por linhas cheias, horizontais, espaçadas logaritmicamente em intervalos de 10 milibares, como mostra a Figura 2.

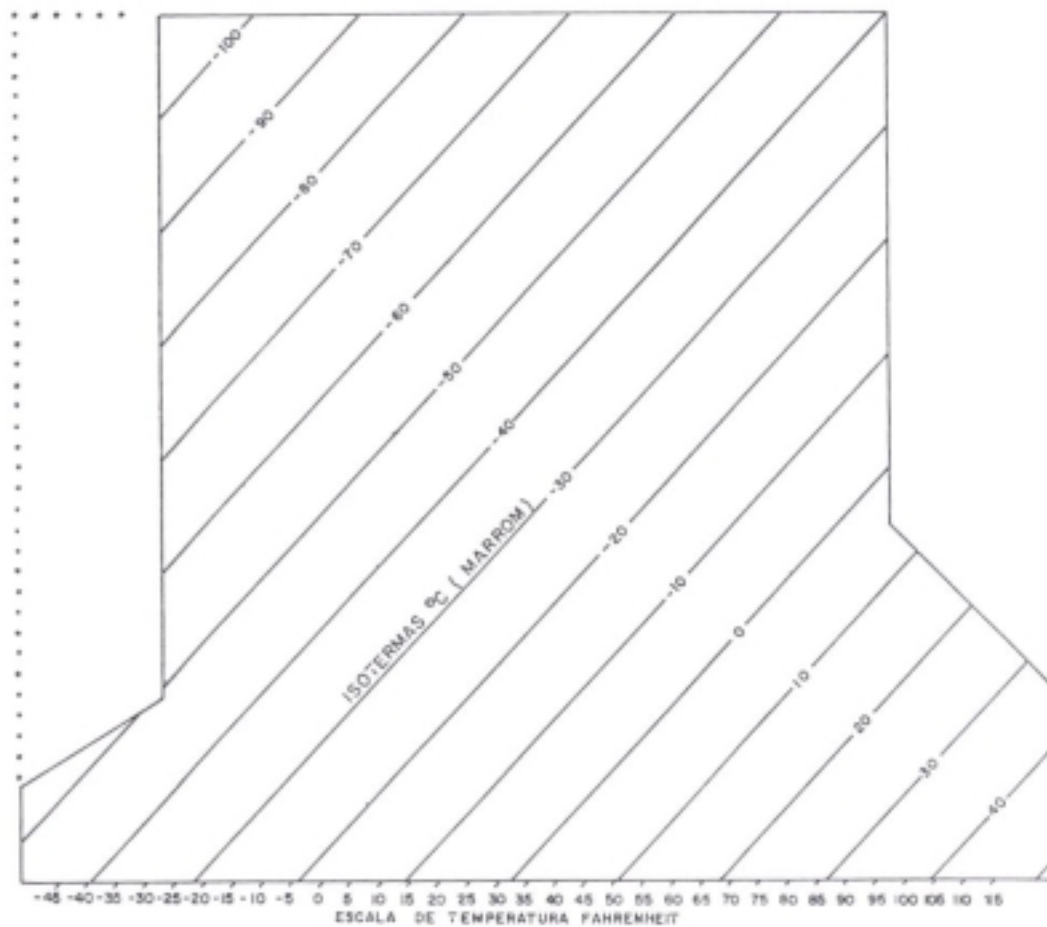
Figura 2: Isóbaras na “Carta Skew T Log P”.



Fonte: Manual do Ministério da Aeronáutica. DRA 105-07, 1969, p. 5.

As isotermas são representadas por linhas retas, cheias que se inclinam do lado inferior esquerdo para o lado superior direito. O espaçamento da isoterma é o mesmo sobre a carta toda. A Figura 3 mostra sua configuração.

Figura 3: Isotermas na “Carta Skew T Log P”.

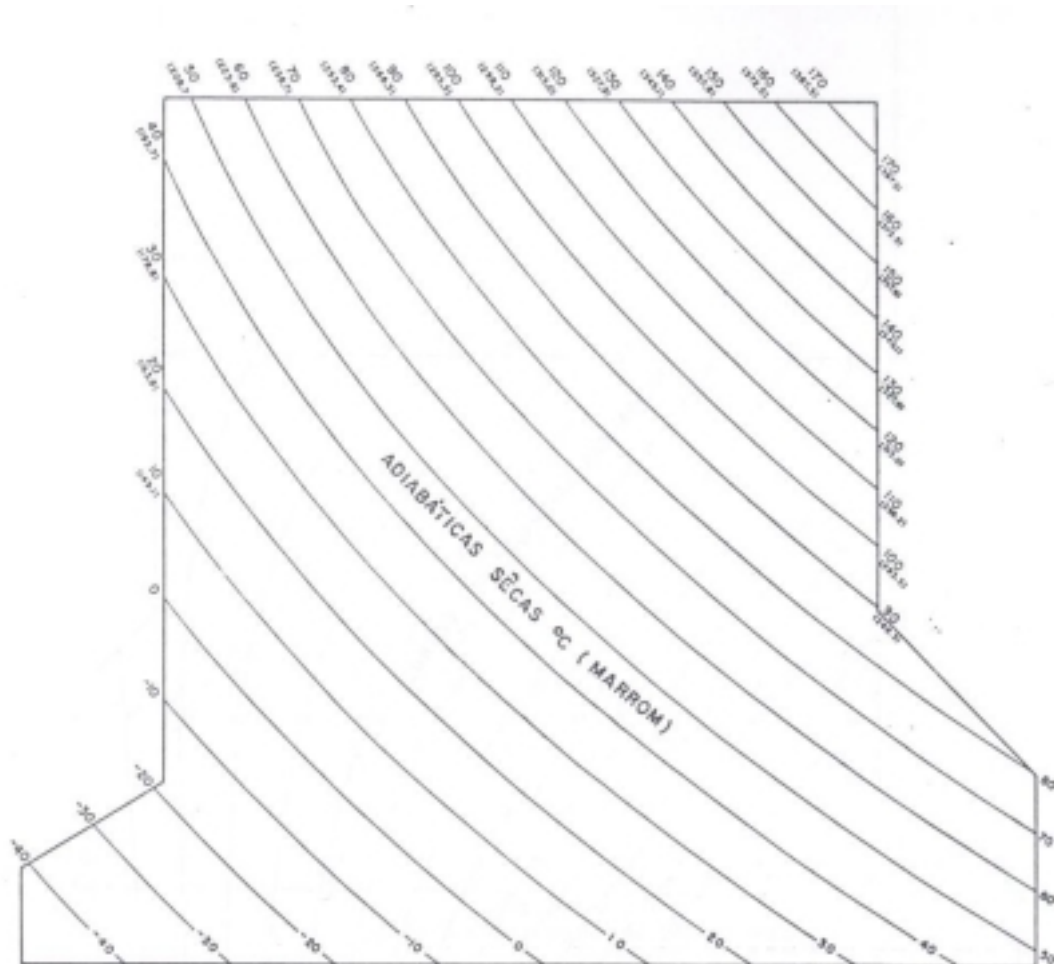


Fonte: MMA-DR-105-07, 1969, p. 6.

As adiabáticas secas são linhas cheias, suavemente curvadas que se inclinam da parte inferior direita para a parte superior esquerda. A transformação adiabática é um processo em que a massa de ar considerada não recebe nem cede calor ao ar circunvizinho. Quando uma parcela de ar sobe na atmosfera, sua temperatura decresce com a taxa adiabática seca até o nível de condensação por levantamento, quando, então, o ar se torna saturado. As adiabáticas secas (Figura 4) são rotuladas em °C. Quando o processo for

adiabático, a variação de temperatura será de 1°C para cada 100m de mudança de altitude. Essa variação é chamada de “gradiente adiabático seco”.

Figura 4: Adiabáticas Secas na “Carta Skew T Log P”.

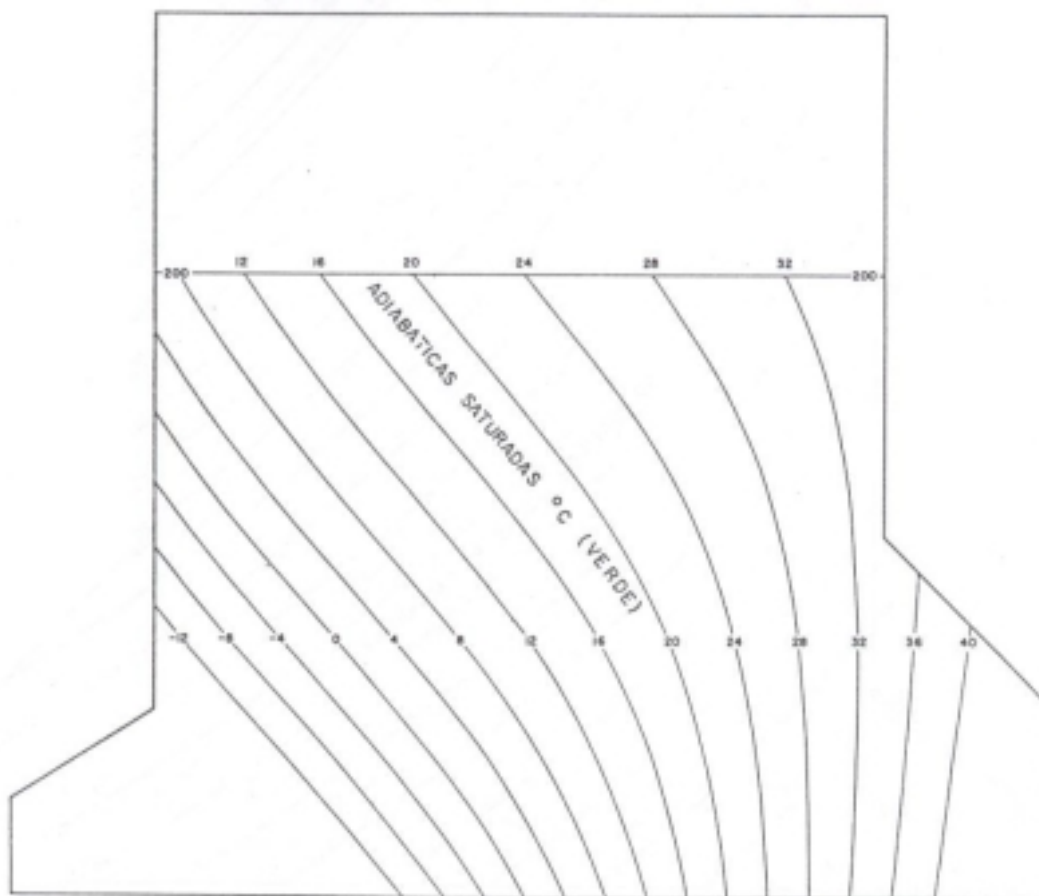


Fonte: MMA-DR-105-07, 1969, p. 7.

As adiabáticas saturadas são linhas cheias, suavemente curvadas, cujo movimento de inclinação ocorre da parte inferior direita para a parte superior esquerda. Assim, quando uma parcela de ar sobe na atmosfera, sua temperatura decresce com a taxa adiabática seca até o nível de condensação por levantamento; então, o ar se torna saturado. Depois de saturado, sua

temperatura diminui numa proporção praticamente constante de $0,65^{\circ}\text{C}$ para cada 100 metros, numa variação chamada de “gradiente adiabático saturado”. Qualquer diminuição subsequente de temperatura ocasionará condensação. A Figura 5 mostra as adiabáticas saturadas.

Figura 5: Adiabáticas Saturadas na Carta “Skew T Log P”.

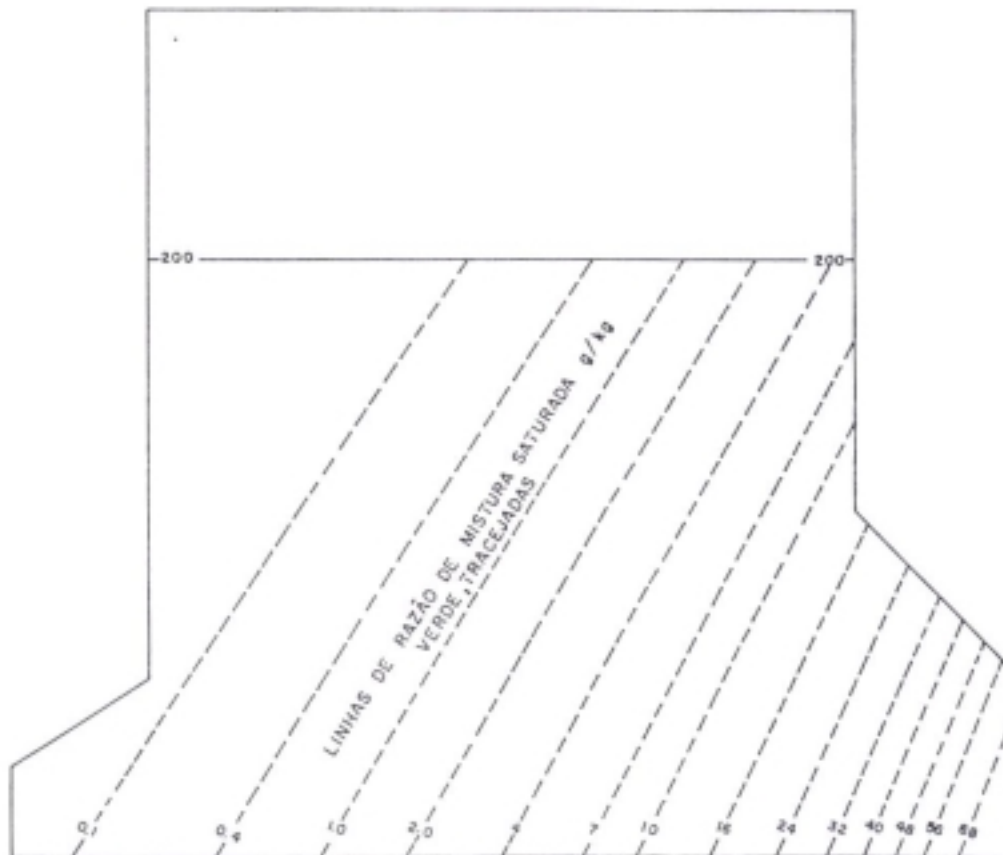


Fonte: MMA-DR-105-07, 1969, p. 8.

As linhas de razão de mistura saturada são linhas tracejadas, suavemente curvadas, que se inclinam da parte inferior esquerda para a parte superior direita. São rotuladas em gramas, por quilograma, isto é, em partes de vapor d'água por 1000 partes de ar seco. O espaçamento entre elas decresce à

medida que seus valores numéricos aumentam. O exemplo dessas linhas está na Figura 6.

Figura 6: Linhas de razão saturada na “Carta Skew T Log P”.



Fonte: MMA-DR-105-07, 1969, p. 9.

2.5 Processo Gráfico para Obtenção de Parâmetros

Na “Carta Skew T Log P”, geralmente são plotadas e traçadas duas curvas para cada sondagem: uma representa a temperatura (T) do ar livre e a outra, a temperatura (T_d) do ponto de orvalho.

Segundo o “Manual de Análise do Diagrama de Skew T Log P” (MMA, 1969), a determinação gráfica de todos os parâmetros envolvidos no estudo de nevoeiro de radiação é possível. Da mesma forma, pode-se determinar a razão de mistura, a razão de mistura saturada, a umidade relativa, a pressão de vapor, a pressão de vapor de saturação e o nível de condensação por levantamento (pressão, temperatura e altura do referido nível).

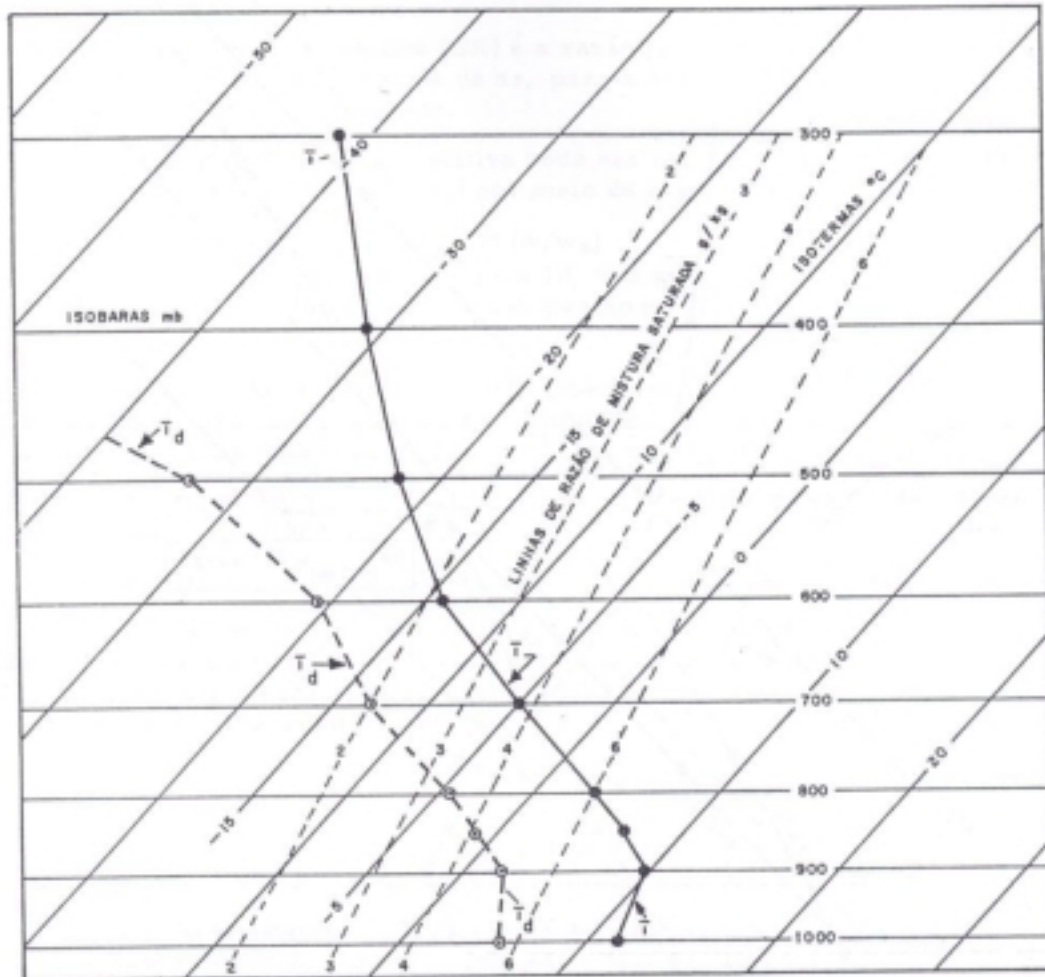
2.5.1 Razão de mistura

Numa amostra de ar úmido, a razão de mistura pode ser definida como a razão da massa de vapor d’água para a massa de ar seco.

Os procedimentos para a determinação da razão de mistura (w) para uma dada pressão em uma sondagem plotada incluem a leitura do valor da linha de razão de mistura que cruza a curva T_d na pressão dada, diretamente ou por interpolação.

Na sondagem apresentada na Figura 7, por exemplo, T_d em 700 hPa é igual a -13°C e o valor da razão de mistura, nesse nível, é de 2,0 g/kg.

Figura 7: Parte de uma sondagem aerológica na “Carta Skew T Log P”.



Fonte: MMA-DR-105-07, 1969, p. 11.

2.5.2 Razão de mistura saturada

A razão de mistura saturada (w_s) é a razão de mistura que uma amostra de ar teria se estivesse saturada.

Para determinar a razão de mistura saturada para uma dada pressão na sondagem plotada, leia o valor da linha de razão de mistura saturada que cruza a curva T na pressão dada, diretamente ou por interpolação. Na sondagem apresentada na Figura 7, T a 700 hPa, é de -5°C e o valor da razão de mistura saturada a 700 hPa é de 3,8 g/kg.

2.5.3 Umidade relativa

Umidade relativa (UR) é a razão, em porcentagem, da quantidade de vapor d'água em um dado volume de ar, para a quantidade que esse volume poderia conter se o ar estivesse saturado. Ela pode ser calculada pela razão de mistura (w) e a razão de mistura saturada (w_s) por meio da seguinte equação:

$$\text{UR} = 100 (w / w_s).$$

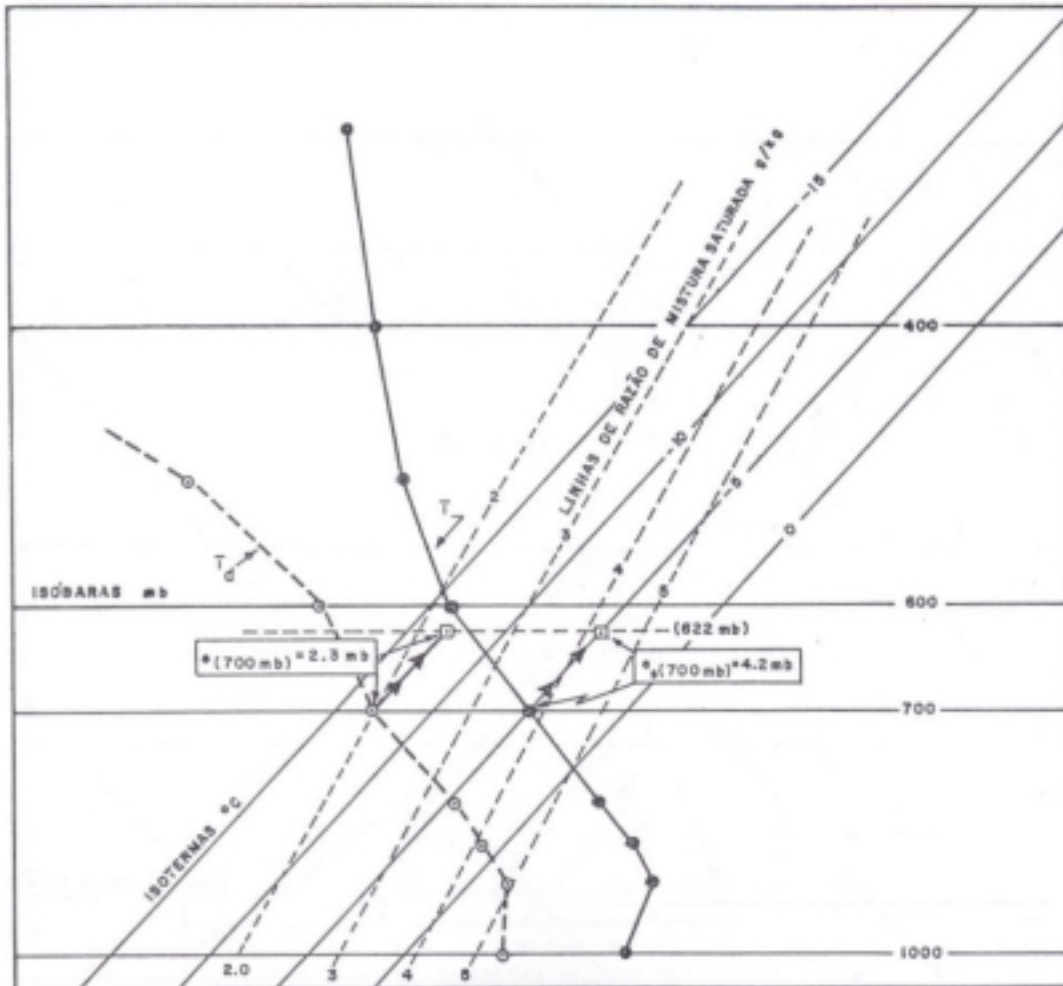
Na sondagem apresentada na Figura nº 7, w e w_s a 700 hPa são, respectivamente, 2,0 e 3,8 g/kg. Portanto, a umidade relativa no nível de 700 hPa é 53%, nessa sondagem.

2.5.4 Pressão de vapor

Pressão de vapor (e) é a parte da pressão atmosférica exercida pelo vapor d'água e que contribui para a pressão atmosférica total. O procedimento para sua determinação é o seguinte: na Figura 8, por exemplo, da curva Td, na pressão dada na sondagem, a 700 hPa, siga paralelamente as isotermas até a

isóbara de 622 hPa. O valor da linha de razão de mistura saturada que passa por esse ponto em 622 hPa, lida por interpolação, se necessário, dá a pressão de vapor em hectopascal, na pressão dada.

Figura 8: Determinação de pressão de vapor (e) e da pressão de vapor saturado (e_s).



Fonte: MMA-DR-105-07, 1969, p. 13.

2.5.5 Pressão de vapor saturado

Pressão de vapor saturado (e_s) é a pressão parcial que o vapor d'água contribuiria para a pressão atmosférica total, se o ar estivesse saturado.

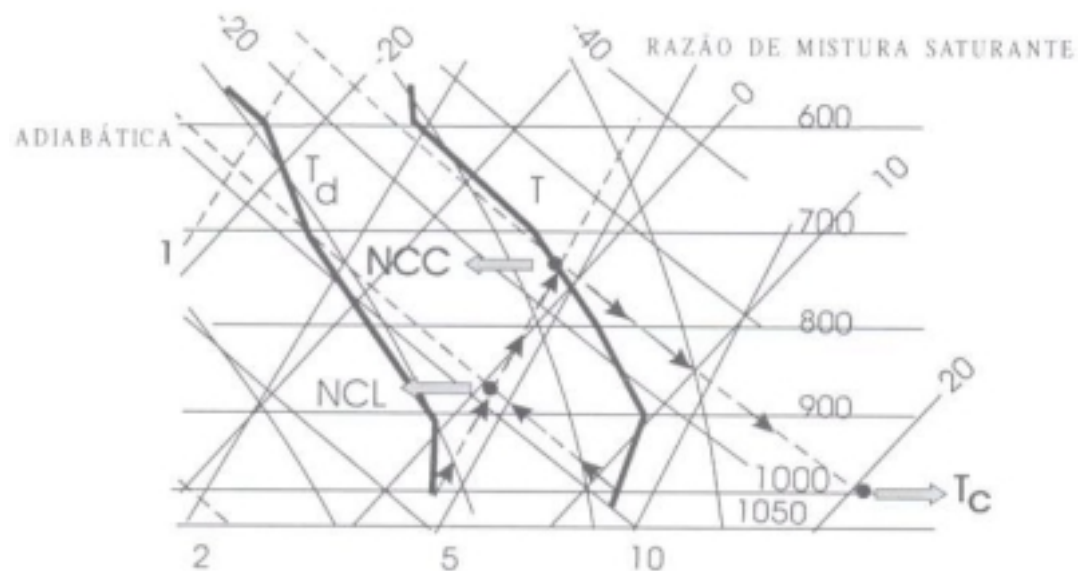
Sua determinação pode ser feita da seguinte forma: tomando-se por referência a Figura 8, por exemplo, da curva T, na pressão dada (700 hPa), siga paralelamente às isotermas até a isóbara de 622 hPa. O valor da linha de razão de mistura saturada que passa por esse ponto em 622 hPa, lida por interpolação se necessário, dá a pressão de vapor saturado na pressão dada, em hectopascal.

2.5.6 Nível de condensação por levantamento

Nível de condensação por levantamento é a altura na qual uma parcela de ar se torna saturada, quando é elevada adiabaticamente seca.

O nível de condensação por levantamento está localizado na interseção da linha de razão de mistura saturada, que passa à superfície através da temperatura do ponto de orvalho, e com a adiabática seca, que passa através da temperatura à superfície. Esse procedimento, ilustrado na Figura 9, possibilita a obtenção da temperatura e da pressão nesse nível. Na Figura 9, o nível de condensação por levantamento está aproximadamente com 880 hPa, e a temperatura de 0°C.

Figura 9: Localização do nível de condensação por levantamento (NCL).



Fonte: MMA-DR-105-07, 1969, p.19.

Esses parâmetros de superfície mais as sondagens aerológicas 0000 UTC (corresponde a 21 horas, hora de Brasília, e no horário de verão equivale a 22 horas) constituem o conteúdo das mensagens METAR – “Meteorological Aerodrome Reports” e mensagem TEMP, que serão tratados estatisticamente.

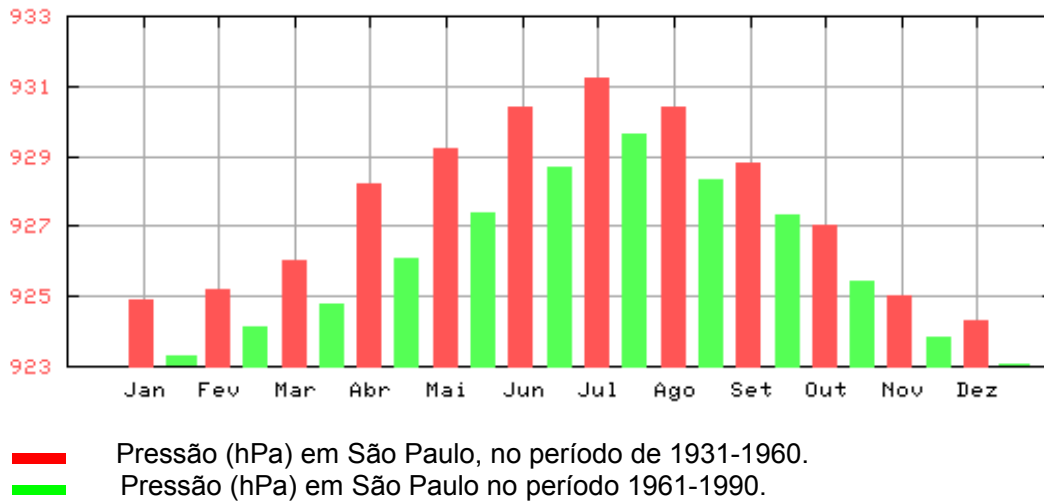
2.6 Climatologia da Cidade de São Paulo

Os gráficos climatológicos do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, mostrados a seguir, apresentam uma tendência climatológica que contribui ao estudo de nevoeiro:

Na Figura 10, nota-se uma maior incidência de pressão alta nos meses de maio a setembro. Geralmente, em uma região sob a influência de alta pressão

atmosférica, observa-se uma predominância de estabilidade do ar, condição favorável à formação de nevoeiro de radiação.

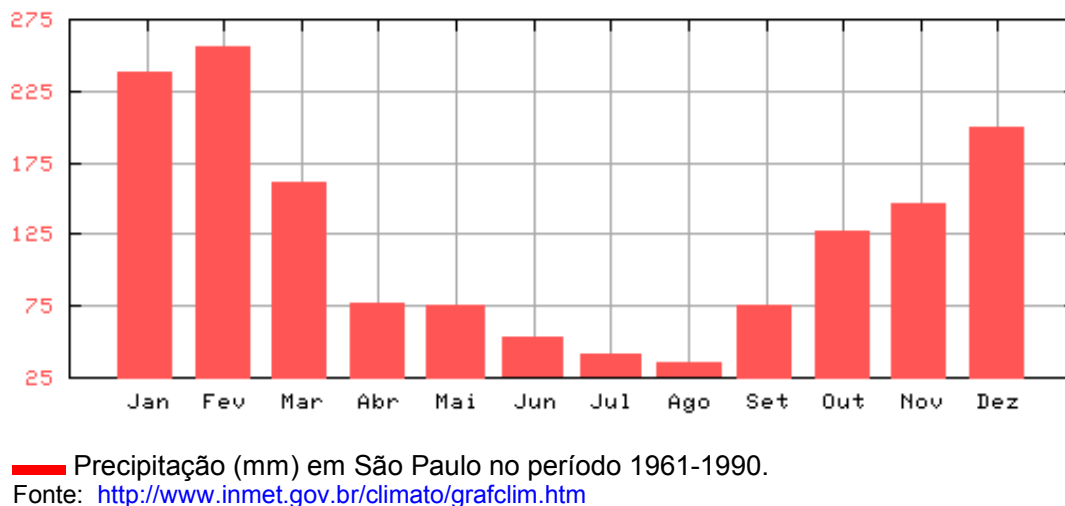
Figura 10: Pressão atmosférica.



Fonte: <http://www.inmet.gov.br/climato/grafclim.htm>

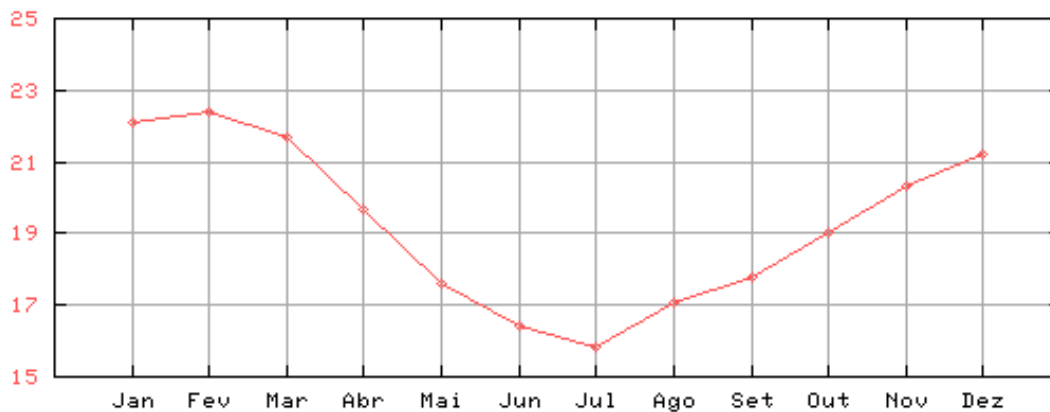
Da mesma forma na Figura 11, no período citado anteriormente, registra-se uma menor ocorrência de precipitação pluviométrica, causando, conseqüentemente, uma maior estabilidade do ar em comparação aos outros meses. Obviamente é o período de maior ocorrência de nevoeiro de radiação.

Figura 11: Precipitação (mm).



As Figuras 12 e 13 apresentam as mesmas características: o predomínio de baixas temperaturas nos meses de maio a agosto, período propício ao nevoeiro de radiação.

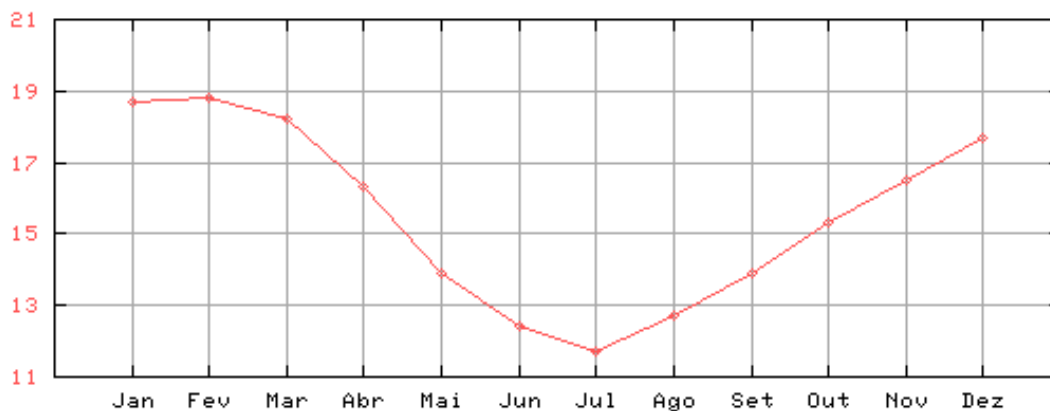
Figura 12: Temperatura média (°C).



— Temperatura Média (°C) em São Paulo no período 1961-1990.

Fonte: <http://www.inmet.gov.br/climato/grafclim.htm>

Figura 13: Temperatura mínima (°C).



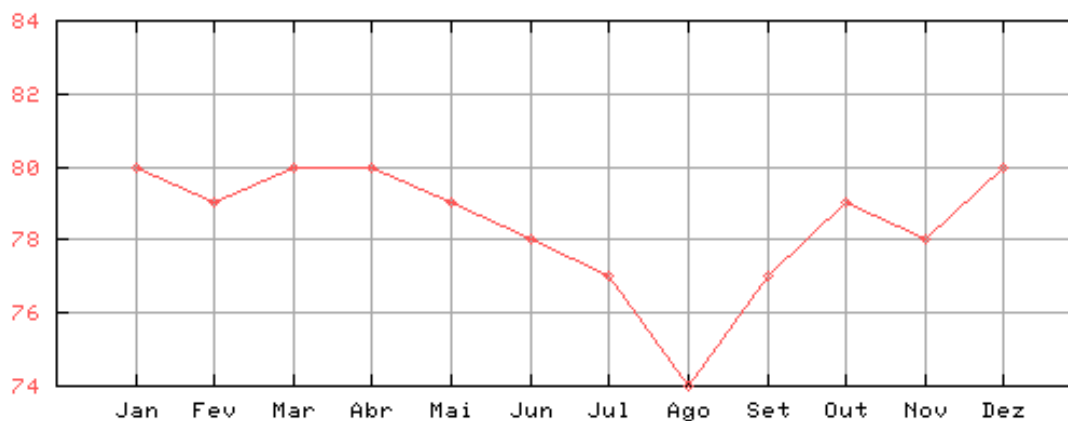
— Temperatura Mínima (°C) em São Paulo no período 1961-1990.

Fonte: <http://www.inmet.gov.br/climato/grafclim.htm>

Na Figura 14, consta uma diminuição gradativa de umidade de abril a agosto, pelas mesmas razões expostas anteriormente, menor ocorrência de

instabilidade, por conseguinte, época de maior predomínio de nevoeiro de radiação.

Figura 14: Umidade do ar (%).

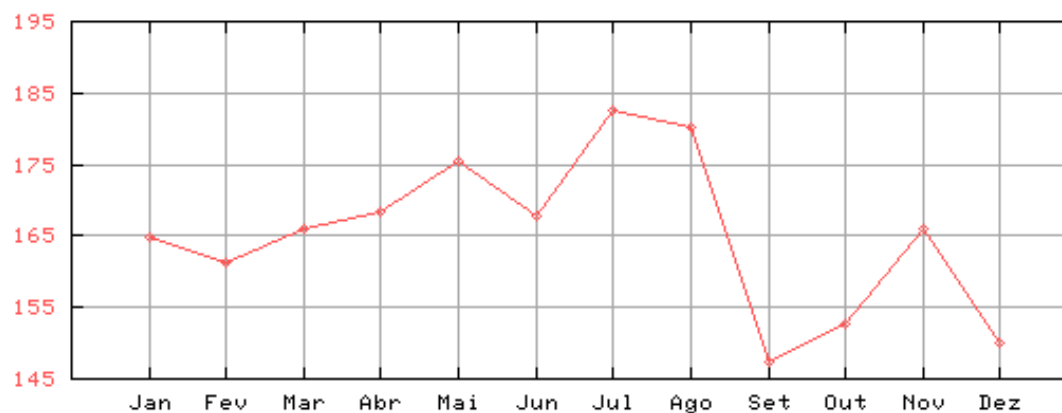


— Umidade (%) em São Paulo no período 1961-1990.

Fonte: <http://www.inmet.gov.br/climato/grafclim.htm>

Na Figura 15, verifica-se maior incidência de insolação nos meses de maio a agosto, isto é, maior período de ocorrência de céu claro, o que facilmente favorece à formação de nevoeiro de radiação.

Figura 15: Insolação (H).

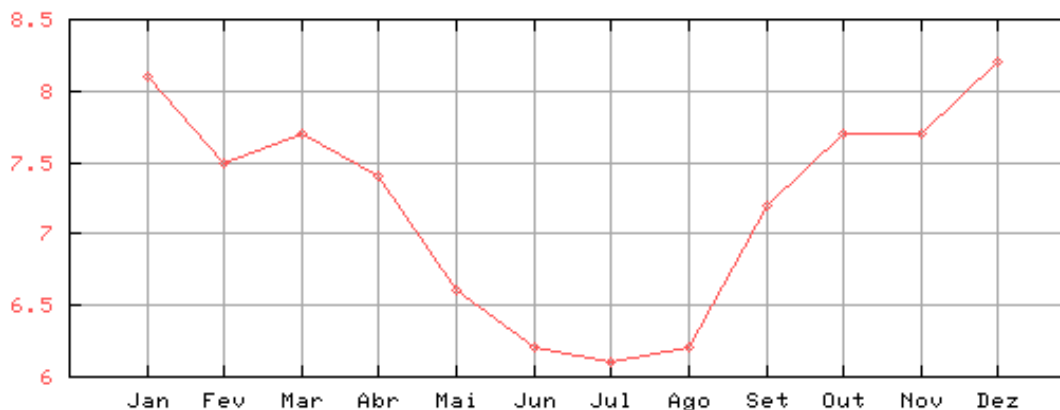


— Insolação (H) em São Paulo no período 1961-1990

Fonte: <http://www.inmet.gov.br/climato/grafclim.htm>

O gráfico da Figura 16 está plenamente em consonância com o gráfico 15, pois o período de maio a agosto registra-se maior insolação, em consequência baixa ocorrência de nebulosidade, propenso à formação de nevoeiro de radiação.

Figura 16: Nebulosidade (décimo).



— Nebulosidade (décimo) em São Paulo no período 1961-1990.

Fonte: <http://www.inmet.gov.br/climato/grafclim.htm>

Em síntese, os gráficos mencionados, analisados no período de maio a agosto, registram predominância de alta pressão atmosférica, estabilidade do tempo, baixas temperaturas, alta insolação e baixa nebulosidade o que são condições convenientes à ocorrência de nevoeiro de radiação.

A seguir, o enfoque é dada para a climatologia dos nevoeiros, onde são abordados inúmeros gráficos sobre o assunto.

2.7 Climatologia dos Nevoeiros no Aeródromo de Guarulhos

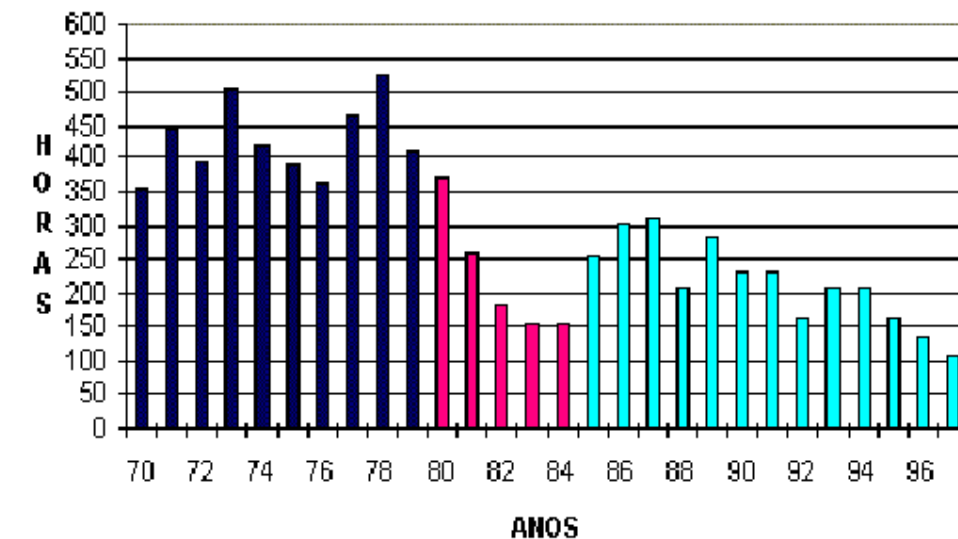
Segundo o ROTAER – Manual Auxiliar de Rotas Aéreas, o Aeródromo de Guarulhos situa-se na latitude 23° 26' 06" S e na longitude 046° 28' 22" W, com

749 metros de altitude. Localiza-se a NE do município de São Paulo, em uma planície no vale do Rio Baquirivu-Guaçu, afluente da margem direita do alto Tietê.

Estudos estatísticos realizados por Cabral (1998), baseados em dados do antigo aeródromo de Cumbica e do atual de Guarulhos, fez no período de 1969 a 1997, uma análise da frequência e da tendência de ocorrência de nevoeiro e chegou a conclusão que após o término das obras do novo aeroporto, em 1984, ficou evidente uma significativa diminuição nos totais de horas de nevoeiro. O ano de 1997 registrou 107 horas do fenômeno, sendo considerado o menor valor da série analisada.

Alega Cabral (1998), que provavelmente com a construção do aeroporto provocou grandes áreas devastadas de vegetação em prol do surgimento de novos bairros pavimentados em seu entorno, reduzindo acentuadamente as fontes de umidade propensas a ocorrências de nevoeiro. A Figura 17 apresenta, serialmente, o decréscimo de horas anuais de nevoeiro.

Figura 17: Gráfico das horas anuais de nevoeiro das Estações Meteorológicas de Cumbica (1969 – 1984) e de Guarulhos (1985 – 1997). Período de construção do Aeroporto de Guarulhos (1980 – 1984).

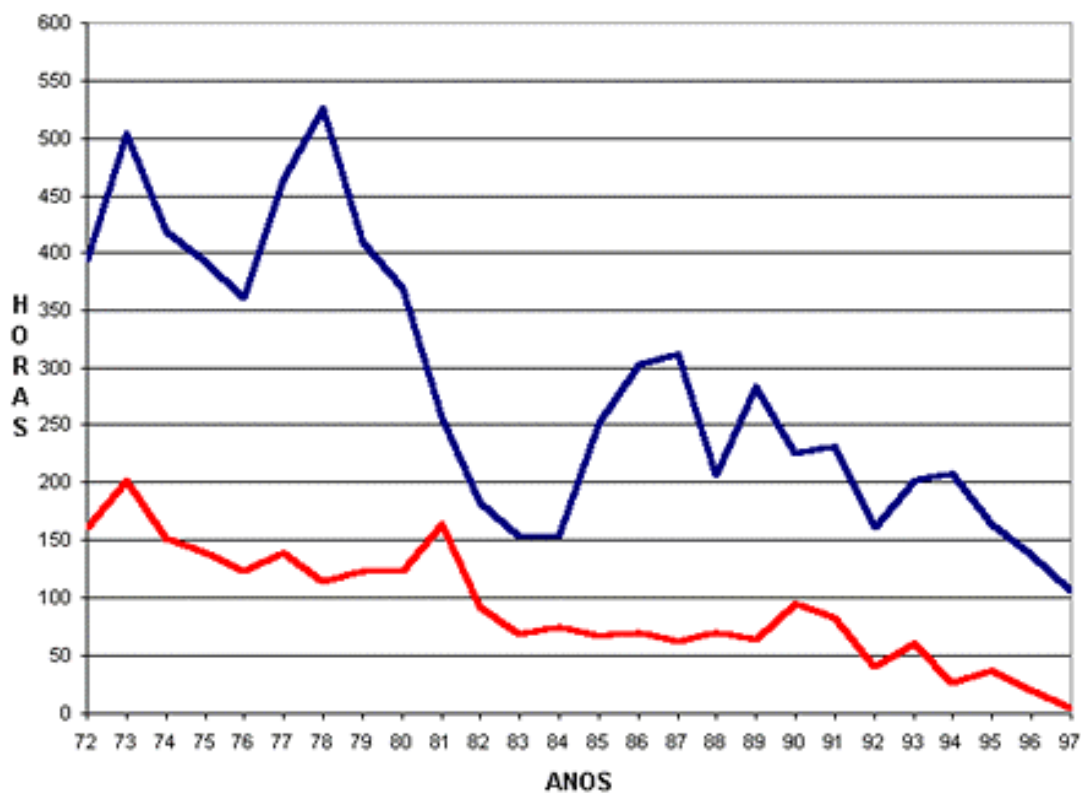


- Dados da Estação Meteorológica de Cumbica, no período de 1969 a 1984.
- Período de construção do Aeroporto de Guarulhos, de 1980 a 1984.
- Dados da Estação Meteorológica de Guarulhos, no período 1985 a 1997.

Fonte: CABRAL, E. Aspectos climatológicos da ocorrência de nevoeiro na área de Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. 1990. Anais do 8º Encontro Nacional de Geógrafos e "VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Salvador/BA".

A Figura 18 revela um quadro comparativo da distribuição anual de horas de nevoeiro dos aeroportos de Guarulhos e Congonhas, com valores mais elevados para o aeroporto de Guarulhos. Cabral (1998) demonstra, claramente, que a devastação da vegetação teve uma influência proeminente na redução dos totais de horas de nevoeiro, pois Congonhas em sua vizinhança com área desprovida de vegetação, densamente pavimentada, apresentou um menor número de horas de nevoeiro em comparação a Guarulhos.

Figura 18: Gráfico comparativo de horas de nevoeiro Guarulhos x Congonhas (1972 a 1997).

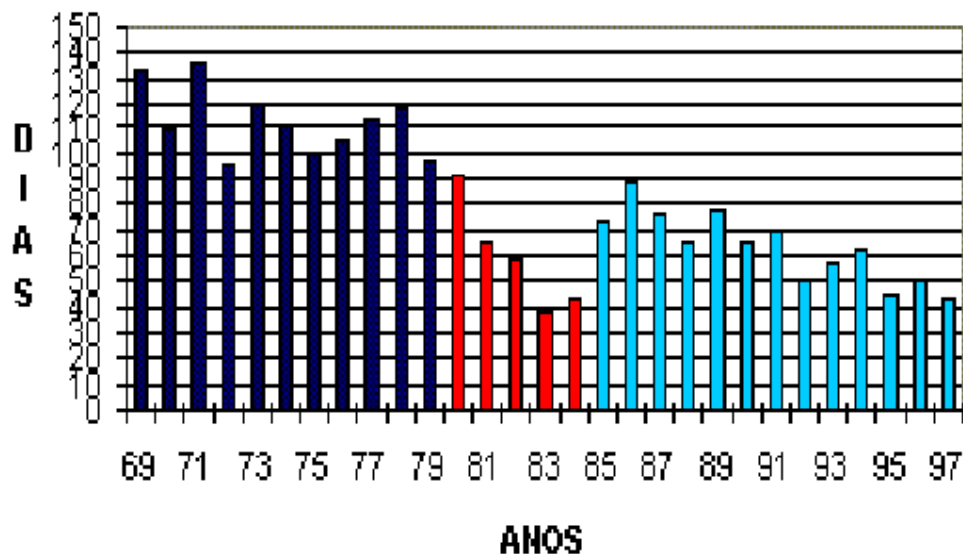


— Congonhas
— Guarulhos

Fonte: CABRAL, E. Aspectos climatológicos da ocorrência de nevoeiro na área de Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. 1990. Anais do 8º Encontro Nacional de Geógrafos e "VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Salvador/BA".

Na Figura 19, verifica-se uma concordância com os resultados da Figura 18, isto é, totais de dias anuais de ocorrência com valores elevados antes da construção do Aeroporto de Guarulhos.

Figura 19: Gráfico da frequência de dias anuais de nevoeiro das estações meteorológicas de Cumbica (1969-1984) e de Guarulhos (1985-1997).

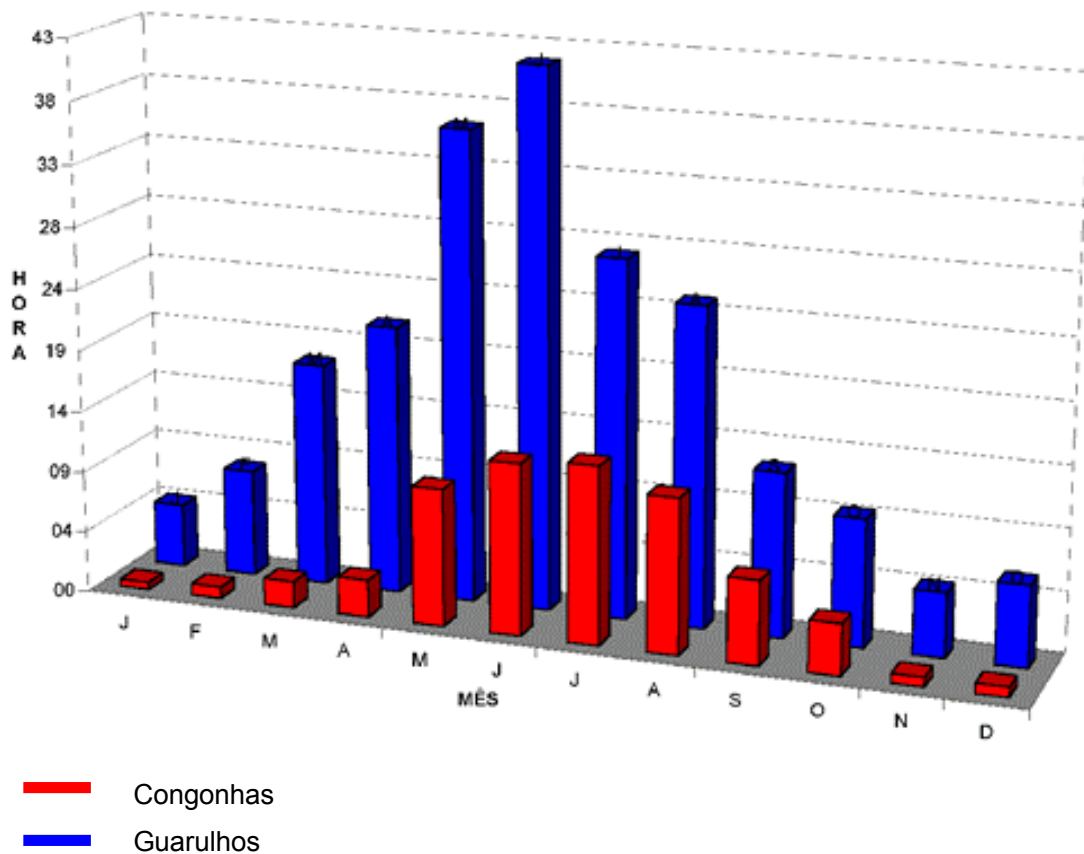


- Dados da Estação Meteorológica de Cumbica, no período de 1969 a 1984.
- Período de construção do Aeroporto de Guarulhos, de 1980 a 1984.
- Dados da Estação Meteorológica de Guarulhos, no período 1985 a 1997.

Fonte: CABRAL, E. Aspectos climatológicos da ocorrência de nevoeiro na área de Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. 1990. Anais do 8º Encontro Nacional de Geógrafos e “VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Salvador/BA”.

Com relação ao gráfico da Figura 20 de Cabral (1998), nota-se uma maior frequência média de nevoeiro nos meses do outono e inverno, período de predominância estável do tempo com temperaturas relativamente baixas, maior número de horas de insolação, menor cobertura de nuvens, condições favoráveis à formação mais freqüente do nevoeiro de radiação.

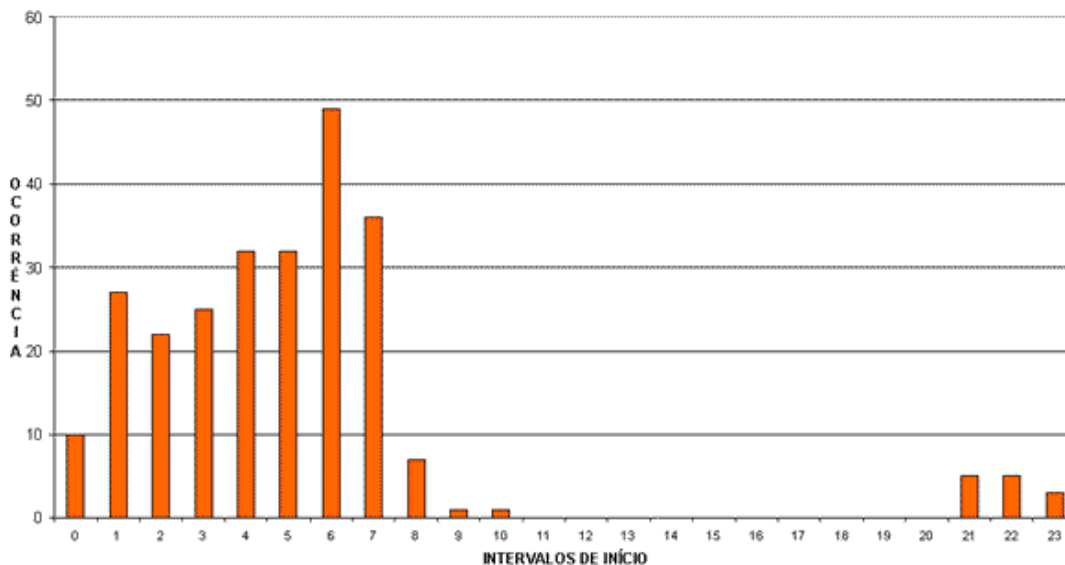
Figura 20: Gráfico das freqüências médias mensais de horas de nevoeiro de Guarulhos e Congonhas no período de 1980/1997.



Fonte: CABRAL, E. Aspectos climatológicos da ocorrência de nevoeiro na área de Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. 1990. Anais do 8º Encontro Nacional de Geógrafos e “VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Salvador/BA”.

Na figura 21, Cabral (1998), demonstra que predomina uma concentração de horas de início de ocorrência de nevoeiro entre 1 e 7 horas local, apresentando um pico entre 6 e 7 horas, quando geralmente se dá a ocorrência de máxima perda radiativa, originando-se mínimas térmicas um pouco antes do nascer do sol, normalmente em condições de estabilidade.

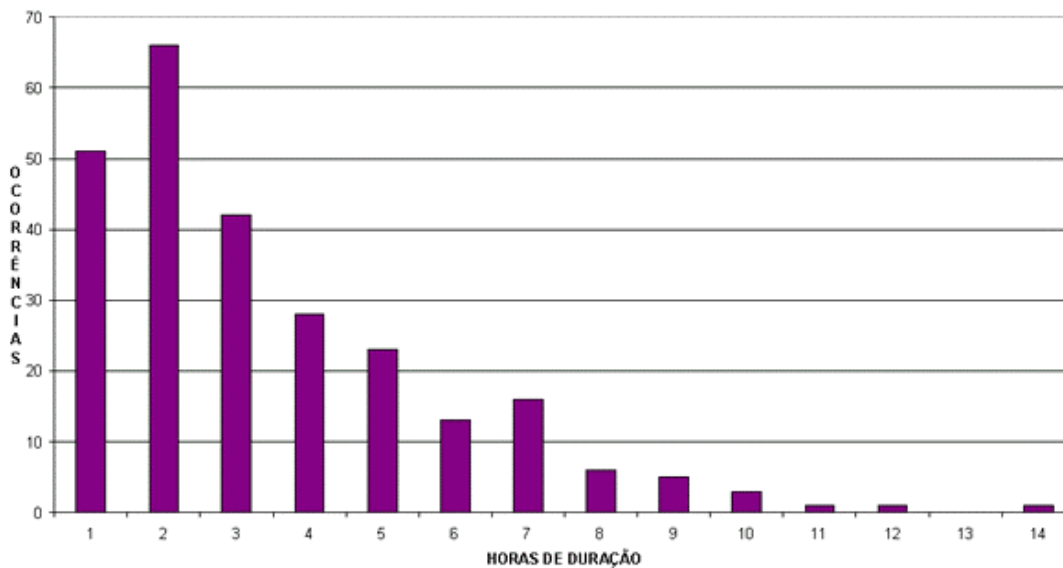
Figura 21: Gráfico dos horários de início de nevoeiro no aeródromo de Guarulhos (1993-1997).



Fonte: CABRAL, E. Aspectos climatológicos da ocorrência de nevoeiro na área de Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. 1990. Anais do 8º Encontro Nacional de Geógrafos e "VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Salvador/BA".

A Figura 22 demonstra que a maior incidência de surgimento de nevoeiro se dá entre uma e três horas. Aduz Cabral (1998), em sua pesquisa, que a vegetação e lagoas em áreas vizinhas ao aeródromo são as fontes de umidade para a formação de nevoeiro, porém o fator urbanização tem influenciado nas alterações climáticas e contribuído para a diminuição de ocorrência e duração dos nevoeiros no aeródromo de Guarulhos.

Figura 22: Gráfico de frequência de duração do nevoeiro no Aeródromo de Guarulhos, no período de 1993 a 1997.



Fonte: CABRAL, E. Aspectos climatológicos da ocorrência de nevoeiro na área de Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. 1990. Anais do 8º Encontro Nacional de Geógrafos e VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Salvador/BA.

Em um estudo baseado em dados de 1969 a 1997, Cabral (1998, p. 267) analisou a frequência e a tendência dos episódios de nevoeiro, concluindo que:

“A forte redução do número de horas de restrição meteorológica no Aeroporto de Guarulhos, no período de 1985 a 1996, devido particularmente à desintensificação dos nevoeiros naquela área, o que tem gerado uma grande melhoria das condições de segurança e na economia dos vôos, pois tem evitado que as aeronaves que tenham aquele aeroporto como destino, alternem em outros aeroportos (Campinas ou Galeão, preferencialmente), com gastos de combustível,

deslocamento de passageiros, tripulantes e pessoal de terra, alimentação, dentre outros”.

Neste estudo, foi possível identificar o período de maior ocorrência de nevoeiro no Aeródromo de Guarulhos.

2.8 Regressão Linear Múltipla

Como o estudo envolve a utilização de regressão linear múltipla é importante tecer alguns comentários a respeito. A variável dependente do estudo é a visibilidade que pode ser afetada por mais de uma variável independente. Em tais casos, deve ser aplicada a técnica de regressão linear múltipla. Seja Y a variável dependente, X_1 e X_2 as variáveis independentes, por exemplo, respectivamente, a quantidade de horas de névoa seca e úmida e a quantidade de horas de céu claro. Admitiremos que a relação entre Y , X_1 e X_2 seja dada pelo modelo de regressão múltipla

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + E_1, \quad (2.1)$$

onde Y_1 representa a variável dependente e X_1 e X_2 as variáveis independentes. Os verdadeiros valores de β_0 , β_1 e β_2 são desconhecidos. β_1 representa o efeito que X_1 tem sobre Y , admitindo que X_2 permaneça constante. Analogamente, β_2 representa o efeito de X_2 sobre Y admitindo que X_1 permaneça constante. Se X_1 aumenta de 1 e tudo mais permanece constante, Y aumenta de β_1 . Quando se planeja o modelo desta forma, admite-se que os efeitos de X_1 e X_2 são aditivos. Isto significa que o quanto X_1

afeta Y não depende do nível de X_2 , e vice-versa. β_0 é o termo constante do modelo. A variável E é chamada de termo erro e que representa os efeitos de todos os fatores que afora os valores de X_1 e de X_2 podem afetar a variável Y . Se há apenas duas variáveis independentes, pode-se fazer um gráfico tridimensional em perspectiva, com X_1 e X_2 nos eixos horizontais, Y no eixo vertical e um ponto correspondendo a cada observação. Procura-se então identificar o plano que minimiza a soma dos quadrados dos desvios verticais entre cada observação e o plano.

2.8.1 Estimação dos parâmetros

Considera-se o caso em que a variável dependente seja postulada como função de duas variáveis explicativas: X_1 e X_2 . Então o modelo de regressão linear múltipla é estabelecido da seguinte maneira:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + U_i \quad (2.2)$$

Quanto mais variáveis são consideradas, as fórmulas alteram-se, mas os métodos, em princípio, são os mesmos.

Retirada uma amostra de “ n ” observações das variáveis Y , X_1 e X_2 , há, a partir desses dados, a necessidade da determinação das estimativas “ a ”, “ b_1 ” e “ b_2 ” dos parâmetros α , β_1 e β_2 e, dessa forma, obter a estimativa do modelo adotado, compondo o estimador $\hat{Y} = a + b_1X_1 + b_2X_2$.

Calcula-se “a”, “b₁” e “b₂” de tal forma que os quadrados dos desvios dos valores observados em relação aos calculados para Y sejam um mínimo. Isto exige que

$$M = \sum (Y - \hat{Y})^2 = \sum (Y - a - b_1X_1 - b_2X_2)^2 \quad (2.3)$$

seja um mínimo. Para tanto, compulsoriamente tem que se considerar:

$$\frac{\partial M}{\partial a} = 0 \quad \frac{\partial M}{\partial b_1} = 0 \quad \frac{\partial M}{\partial b_2} = 0 \quad (2.4)$$

ou seja:

$$\frac{\partial M}{\partial a} = -2 \sum (Y - a - b_1X_1 - b_2X_2) = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial M}{\partial b_1} = -2 \sum X_1 (Y - a - b_1X_1 - b_2X_2) = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial M}{\partial b_2} = -2 \sum X_2 (Y - a - b_1X_1 - b_2X_2) = 0 \quad (2.7)$$

Fornecendo-nos as três equações normais para a determinação de “a”, “b₁” e “b₂”:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum Y = na + b_1 \sum X_1 + b_2 \sum X_2 \quad (2.8) \\ \sum YX_1 = a \sum X_1 + b_1 \sum X_1^2 + b_2 \sum X_1X_2 \quad (2.9) \\ \sum YX_2 = a \sum X_2 + b_1 \sum X_1X_2 + b_2 \sum X_2^2 \quad (2.10) \end{array} \right.$$

Resolvendo o sistema, dividindo-se a equação (2.8) por “n”, resulta em:

$$\frac{\sum Y}{n} = \frac{na}{n} + b_1 \frac{\sum X_1}{n} + b_2 \frac{\sum X_2}{n}, \quad (2.11)$$

ou seja,

$$\bar{Y} = a + b_1 \bar{X}_1 + \bar{X}_2 \quad \text{ou} \quad a = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2$$

Em seguida, efetuando a substituição do valor de “a” na equação (2.9), vem:

$$\sum YX_1 = \sum X_1(\bar{Y} - b_1\bar{X}_1 - b_2\bar{X}_2) + b_1\sum X_1^2 + b_2\sum X_1X_2 \quad (2.12)$$

$$= \sum X_1\bar{Y} - \sum X_1b_1\bar{X}_1 - \sum X_1b_2\bar{X}_2 + b_1\sum X_1^2 + b_2\sum X_1X_2$$

$$= \frac{\sum X_1\sum Y}{n} - b_1\sum X_1\frac{\sum X_1}{n} - b_2\sum X_1\frac{\sum X_2}{n} + b_1\sum X_1^2 + b_2\sum X_1X_2$$

$$= \frac{\sum X_1\sum Y}{n} - b_1\frac{(\sum X_1)^2}{n} - b_2\frac{\sum X_1\sum X_2}{n} + b_1\sum X_1^2 + b_2\sum X_1X_2$$

$$= \frac{\sum X_1\sum Y}{n} - b_1\frac{(\sum X_1)^2}{n} - b_2\frac{\sum X_1\sum X_2}{n} + b_1\sum X_1^2 + b_2\sum X_1X_2 \quad (2.13)$$

Colocando-se “b₁” e “b₂” em evidência, fica:

$$\sum YX_1 - \frac{\sum X_1\sum Y}{n} = b_1\left[\sum X_1^2 - \frac{(\sum X_1)^2}{n}\right] + b_2\left[\sum X_1X_2 - \frac{\sum X_1\sum X_2}{n}\right] \quad (2.14)$$

Chamando $S_{Y_1} = \sum YX_1 - \frac{\sum X_1\sum Y}{n}$, $S_{11} = \sum X_1^2 - \frac{(\sum X_1)^2}{n}$ e

$S_{12} = \sum X_1X_2 - \frac{\sum X_1\sum X_2}{n}$, resulta :

$$S_{Y_1} = b_1S_{11} + b_2S_{12} \quad (2.15)$$

Analogamente, substituindo-se o valor de “a” na equação (2.10), fica:

$$S_{Y_2} = b_1S_{21} + b_2S_{22} \quad (2.16)$$

Então, uma das maneiras para encontrar os valores “a”, “b₁” e “b₂” é resolver o sistema abaixo discriminado.

$$\begin{cases} S_{Y_1} = b_1S_{11} + b_2S_{12} & (2.17) \\ S_{Y_2} = b_1S_{21} + b_2S_{22} & (2.18) \end{cases}$$

Resultam-se os seguintes valores para “b₁” e “b₂”:

$$b_2 = \frac{\frac{S_{Y2} - S_{Y1}}{S_{21}} - \frac{S_{Y1}}{S_{11}}}{\frac{S_{22} - S_{12}}{S_{12}} - \frac{S_{12}}{S_{11}}} \quad b_1 = \frac{S_{Y2}}{S_{21}} - \frac{S_{22}}{S_{21}} b_2 \quad (2.19)$$

que se constituirão na solução do sistema. Encontrando “b₁” e “b₂”, determina-se o valor de “a”, isto é:

$$a = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2 \quad (2.20)$$

Na existência de “K” variáveis explicativas, para obtenção dos estimadores “b₁”, “b₂”, “b₃”, ..., “b_k” do modelo

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k + U_i, \quad (2.21)$$

há necessidade de ser solucionado o sistema abaixo:

$$\begin{aligned} S_{Y1} &= b_1 S_{11} + b_2 S_{12} + b_3 S_{13} + \dots + b_k S_{1k} \\ S_{Y2} &= b_1 S_{21} + b_2 S_{22} + b_3 S_{23} + \dots + b_k S_{2k} \\ S_{Y3} &= b_1 S_{31} + b_2 S_{32} + b_3 S_{33} + \dots + b_k S_{3k} \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ S_{YK} &= b_1 S_{k1} + b_2 S_{k2} + b_3 S_{k3} + \dots + b_k S_{kk}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

sendo que “a” será obtido através da fórmula:

$$a = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2 - b_3 \bar{X}_3 - \dots - b_k \bar{X}_k. \quad (2.23)$$

2.8.2 Estudo das variações residuais

O coeficiente de determinação nos dá uma medida da eficiência das equações para aproximar os dados. Para a i-ésima observação, a diferença entre o valor observado da variável dependente Y_i e o valor estimado da

variável dependente \hat{Y} é chamada de i-ésimo resíduo. O i-ésimo representa o erro quando usamos Y_i para estimar \hat{Y}_i . Dessa forma, para a i-ésima observação o resíduo é $Y_i - \hat{Y}_i$. A soma dos quadrados desses resíduos ou erros é a quantidade que é minimizada pelo método dos mínimos quadrados. Essa quantidade, também é conhecida como a soma dos quadrados devido ao erro ou variação residual (VR):

$$VR = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (2.24)$$

onde VR é a medida de erro quando se usa a equação de regressão estimada para estimar o valor da variável dependente.

Agora se não se conhece nenhuma variável relacionada com Y, usa-se a média dos Y da amostra como uma estimativa de Y, isto é, da visibilidade:

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n}. \quad (2.25)$$

Para a i-ésima visibilidade da amostra, a diferença $Y_i - \bar{Y}$ fornece uma medida do erro envolvido quando se usa \bar{Y} para estimar a visibilidade. A soma dos quadrados correspondentes é chamada soma total dos quadrados ou variação total (VT):

$$VT = \sum (Y_i - \bar{Y})^2, \quad (2.26)$$

que é também conhecida em alguns livros por S_{yy} . Conclui-se que a variação total é uma medida da exatidão com que as observações da visibilidade aglomeram-se ao redor da reta visibilidade média, enquanto que a variação residual é uma medida da exatidão com que as visibilidades observadas da amostra aglomeram-se ao redor da visibilidade prevista (\hat{Y}).

Para quantificar em que medida os valores de visibilidade prevista \hat{Y} na regressão calculada se desviam da visibilidade média \bar{Y} , é chamada de soma dos quadrados devido a regressão ou variação explicada pelas variáveis independentes, denotada por VE. $VE = \sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$, ou seja:

$$VE = \sum(a + b_1X_1 + b_2X_2 - a - b_1\bar{X}_1 - b_2\bar{X}_2)^2, \quad (2.27)$$

pois $\hat{Y} = a + b_1X_1 + b_2X_2$ e $\bar{Y} = a + b_1\bar{X}_1 + b_2\bar{X}_2$.

Então:

$$\begin{aligned} VE &= \sum[b_1(X_1 - \bar{X}_1) + b_2(X_2 - \bar{X}_2)]^2 \\ &= \sum b_1^2 (X_1 - \bar{X}_1)^2 + \sum b_2^2 (X_2 - \bar{X}_2)^2 + 2\sum b_1b_2(X_1 - \bar{X}_1)(X_2 - \bar{X}_2) \\ &= b_1^2 \sum (X_1 - \bar{X}_1)^2 + b_2^2 \sum (X_2 - \bar{X}_2)^2 + 2b_1b_2 \sum (X_1 - \bar{X}_1)(X_2 - \bar{X}_2) \\ &= b_1^2 S_{11} + b_2^2 S_{22} + 2b_1b_2 S_{12} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Mas, lembrando do sistema formado pelas equações (2.17) e (2.18) e multiplicando-se a equação (2.17) por b_1 e (2.18) por b_2 , teremos:

$$\begin{cases} b_1 S_{Y1} = b_1^2 S_{11} + b_1 b_2 S_{12} \\ b_2 S_{Y2} = b_1 b_2 S_{21} + b_2^2 S_{22} \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} b_1^2 S_{11} = b_1 S_{Y1} - b_1 b_2 S_{12} \\ b_2^2 S_{22} = b_2 S_{Y2} - b_1 b_2 S_{12} \end{cases} \quad (2.29)$$

Substituindo-se os valores de $b_1^2 S_{11}$ e de $b_2^2 S_{22}$ em (1), fica:

$$VE = b_1 S_{Y1} - b_1 b_2 S_{12} + b_2 S_{Y2} - b_1 b_2 S_{12} + 2b_1 b_2 S_{12}, \quad (2.30)$$

finalmente conclui-se que $VE = b_1 S_{Y1} + b_2 S_{Y2}$, isto é:

$$VE = \sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2 = b_1 S_{Y1} + b_2 S_{Y2}, \quad (2.31)$$

tendo, por exemplo, b_1 e b_2 , respectivamente como o coeficiente de quantidade de horas de névoa seca e/ou úmida e o coeficiente de horas de céu claro, durante 12 horas a partir de 0000 UTC. Relembrando que

$$S_{Y1} = \sum YX_1 - \frac{\sum Y \sum X_1}{n} \quad e \quad S_{Y2} = \sum YX_2 - \frac{\sum Y \sum X_2}{n},$$

onde X_1 =quantidade de horas de névoa e/ou úmida, Y =visibilidade observada e n =total da amostra.

2.8.3 Coeficiente de explicação ou de determinação múltipla

O coeficiente de determinação múltipla, denotado por R^2 , pode ser interpretado como a porção da variabilidade na variável dependente que pode ser explicada pela equação de regressão múltipla estimada. Dessa forma, quando ele é multiplicado por 100, pode ser interpretado como a porcentagem de variação em Y que pode ser explicada pela equação de regressão estimada. Em geral, R^2 sempre aumenta à medida que mais variáveis independentes são adicionadas ao modelo. Considerando duas variáveis independentes: a variação total equivale à variação residual mais a variação explicada, logo:

$$VR = \sum(Y - \hat{Y})^2 = VT - (b_1S_{Y_1} + b_2S_{Y_2})$$

Assim o coeficiente de determinação múltipla é dado por:

$$R^2 = 1 - \frac{VR}{VT} = \frac{VE}{VT}, \quad (2.32)$$

tal que $0 \leq R^2 \leq 1$ ou $0 \leq R^2 \leq 100\%$.

2.8.4 Estimador de variância

Segundo Anderson (2002), a variância σ^2 do erro do modelo de regressão linear múltipla constitui-se em um indicador da qualidade do ajustamento. O estimador de variância é também conhecido como erro quadrático médio. A expressão da variância amostral é dada por:

$$S^2 = \frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{n - K - 1} = \frac{VR = \text{Variação residual} = \text{erro}}{n - K - 1}, \quad (2.33)$$

onde n=número de observações das variáveis do modelo; K=número de variáveis independentes.

No caso de um modelo com duas variáveis independentes,

$$S^2 = \frac{VT - (b_1S_{Y_1} + b_2S_{Y_2})}{n - 2 - 1} \quad (2.34)$$

e para um caso geral:

$$S^2 = \frac{VT - (b_1S_{Y_1} + b_2S_{Y_2} + b_3S_{Y_3} + \dots + b_KS_{Y_K})}{n - K - 1} \quad (2.35)$$

Quanto à estimativa do desvio padrão, teremos: $S = \sqrt{S^2}$. Quanto menor for o valor de S, melhores serão os indicadores da qualidade do modelo adotado. A escolha entre dois modelos diferentes poderá ser orientada para o modelo

que apresente o menor desvio padrão. O valor resultante, S , é também conhecido por erro-padrão da estimativa.

2.8.5 Teste de hipótese para a existência de regressão linear múltipla

Segundo Martins (1980), é importante testar o modelo, visando realizar previsões para Y com certa segurança, através de um roteiro para o teste de um modelo com variáveis independentes, seguindo os passos:

1º Passo: Enunciar as hipóteses:

$$\begin{aligned} H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0 \\ H_1 : \beta_1 \neq 0 \text{ e } \beta_2 \neq 0; \end{aligned} \quad (2.36)$$

2º Passo: Fixar o nível de significância α . Por exemplo: $\alpha = 5\%$ e escolher uma variável “F” com 2 graus de liberdade no numerador e $n - 3$ graus de liberdade no denominador;

3º Passo: Com o auxílio da tabela de distribuição F, determinar a RA (região de aceitação) e a RC (região crítica);

4º Passo: Elaborar o Quadro de Análise das Variâncias, conforme Tabela 1:

Tabela 1: Quadro de Análise de Variâncias.

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	Teste F
Devido às variáveis X_1 e X_2	$VE = b_1S_{Y1} + b_2S_{Y2}$	2	$\frac{b_1S_{Y1} + b_2S_{Y2}}{2}$	$F_{cal} = \frac{\frac{b_1S_{Y1} + b_2S_{Y2}}{2}}{S^2}$
Residual	$VR = VT - VE$	$n - 3$	$S^2 = \frac{VR}{n - 3}$	
Total	$VT = S_{YY}$	$n - 1$		

5º Passo: Conclusão: se $F_{\text{cal}} > F_{\text{tab}}$ rejeita-se H_0 , concluindo-se, com risco α , que existe regressão linear múltipla, isto é: o modelo pode explicar e prever a variável Y.

Segundo Anderson (2002), dada uma relação significativa, somente a análise de hipótese não basta, deve-se, como medida de segurança, usar a equação de regressão estimada para previsões correspondentes a valores de x dentro do intervalo de valores de x observados na amostra. Mas a menos que razões indiquem que o modelo é válido, previsões fora do intervalo da variável independente devem ser feitas com cuidado.

2.8.6 Teste de hipótese dos parâmetros β_i

Uma vez obtida a estimação do modelo, pode-se determinar a importância de uma ou mais variáveis independentes. Testa-se a hipótese com respeito aos parâmetros β_i associados com as variáveis independentes. Assim podemos testar $\beta_i = 0$ ($H_0 : \beta_i = 0$) contra ($H_1 : \beta_i \neq 0$).

Se H_0 é rejeitada, conclui-se que $\beta_i \neq 0$ e que a variável X_i tem uma relação estatisticamente significativa. Entretanto, se H_0 não for rejeitada, há evidências insuficientes para concluir que a relação significativa existe.

Segundo Anderson (2002), é necessário calcular o erro padrão da estimativa S da amostra.

Temos $S = \sqrt{S^2}$, sendo que

$$S^2 = \frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{n - k - 1} = \frac{\text{VR} = \text{Variação Residual} = \text{erro}}{n - k - 1},$$

onde n=tamanho da amostra, k=número de variáveis independentes. Também é possível calcular S^2 da seguinte forma:

$$S = \frac{S_{YY} - (b_1 S_{Y1} + b_2 S_{Y2})}{n - k - 1},$$

considerado $K=2$, por ter adotado no estudo 2 variáveis independentes. Conforme Anderson (2002), após o cálculo do erro padrão, é possível a obtenção da estimativa do desvio padrão de b_i , isto é:

$$S_{b_i} = \frac{S}{\sqrt{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}}. \quad (2.37)$$

O teste t para uma relação significativa é baseado no fato de que a estatística do teste

$$\frac{b_i - \beta_i}{S_{b_i}} \quad (2.38)$$

segue uma distribuição t com n-2 graus de liberdade. Se a hipótese nula é verdadeira, então

$$\beta_i = 0 \quad \text{e} \quad t = \frac{b_i}{S_{b_i}}.$$

Com $\frac{b_i}{S_{b_i}}$ como estatística do teste, os passos do teste t para uma relação

significante são como se segue:

1º Passo: Estabelecer as hipóteses: $H_0: \beta_i = 0$;
 $H_1: \beta_i \neq 0$;

2º Passo: Determinar a estatística do teste $t = \frac{b_i}{S_{b_i}}$;

3º Passo: Fixar o nível de significância α . Por exemplo: $\alpha = 5\%$;

4º Passo: Rejeitar H_0 , se $t < t_{\alpha/2}$ ou $t > t_{\alpha/2}$, onde $t_{\alpha/2}$ é baseado em uma distribuição t com n-2 graus de liberdade;

5º Passo: Conclusão: se o 4º passo ocorrer rejeição, conclui-se com risco α que o coeficiente β_i é diferente de zero. O valor $t_{\frac{\alpha}{2}}$ é obtido na tabela de distribuição t de Student.

A evidência estatística é suficiente para concluir ou não que possa haver uma relação significativa entre a variável dependente e a cada variável independente.

2.8.7 Construção de intervalo de confiança para o coeficiente β_i

Na análise da regressão múltipla, uma estimativa do intervalo de confiança pode ser obtida a partir de:

$$P\left(b_i - t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{S_{xx}}} \leq \beta_i \leq b_i + t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{S_{xx}}}\right) = (1 - \alpha) 100,$$

onde a distribuição t é tomada com (n-2) graus de liberdade, e os valores $\pm t_{\frac{\alpha}{2}}$

obtidos na tabela t de Student.

2.8.8 Intervalo de confiança para $E(Y_h)$

Conforme cita Azevedo (1997), para a obtenção do referido intervalo de confiança, é necessário efetuar o seguinte procedimento:

1º Passo: Elaborar uma matriz X , constituída de valores das variáveis independentes:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1,p-1} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2,p-1} \\ \vdots & \vdots & & & \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{n,p-1} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

2º Passo: Obter a matriz transposta X' de X :

$$X' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_{11} & X_{21} & \dots & X_{n1} \\ X_{12} & X_{22} & \dots & X_{n2} \\ \vdots & & & \\ X_{1,p-1} & X_{2,p-1} & \dots & X_{n,p-1} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

3º Passo: Obter a matriz $X'X$;

4º Passo: Calcular a inversa $(X'X)^{-1}$ de $X'X$;

5º Passo: Escolher os valores das variáveis independentes de interesse. No caso do modelo constituir-se de duas variáveis independentes, denotaram seus valores de X_{h1} e X_{h2} , respectivamente.

6º Passo: Construir um vetor X_h com os valores definidos no 5º passo, da seguinte forma:

$$X_h = \begin{bmatrix} 1 \\ X_{1h} \\ X_{2h} \end{bmatrix}; \quad (2.41)$$

7º Passo: Calcular o valor previsto de \hat{Y}_h , onde:

$$\hat{Y}_h = X'_h b = [1 \quad X_{1h} \quad X_{2h}] \cdot \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (2.42)$$

sendo a, b_1 e b_2 as estimativas de α , β_1 e β_2 do modelo de regressão.

8º Passo: Calcular o estimador do desvio padrão de \hat{Y}_h :

$$S(\hat{Y}_h) = \sqrt{QME[X'_h(X'X)^{-1}X_h]} \quad (2.43)$$

sendo QME o erro quadrado médio cujo valor pode ser diretamente extraído do quadro de análise de variância gerado pelo software Microsoft Excel.

9º Passo: Definir um nível de significância α , por exemplo, $\alpha = 5\%$. Através da distribuição t de Student, obter:

$$t\left(\frac{\alpha}{2}; n-3\right); \quad (2.44)$$

10º Passo: Calcular o intervalo de confiança em questão. Segundo Azevedo (1997), o intervalo de confiança é dado por:

$$\hat{Y}_h - \left(t \frac{\alpha}{2}\right)(S(\hat{Y}_h)) \leq E(Y_h) \leq \hat{Y}_h + \left(t \frac{\alpha}{2}\right)(S(\hat{Y}_h)) . \quad (2.45)$$

Conclui-se com 95% de confiança, que a estimativa média prevista da variável dependente, com os valores adotados para X_{h1} e X_{h2} , estará no intervalo citado no 10º passo.

2.9 Escores de Resultados

O método “skill score” (escore de resultado), com o emprego da tabela de contingência para a contagem de acertos e erros, é utilizado em previsões meteorológica e climatológica. Um exemplo de seu emprego está exposto no endereço: http://weatheroffice.ec.gc.ca/saisons/info_contingency_e.html, do Serviço Meteorológico Aeronáutico do Canadá.

As categorias de informações previstas e observadas são classificadas em uma tabela constituída de duas linhas e duas colunas. Nas linhas estão reportados os valores observados, e nas colunas os previstos. Os valores da diagonal principal fornecem os totais das previsões corretas e os valores da secundária os totais das previsões incorretas.

Tabela 2: Modelo de Tabela de Contingência.

		Previsto		Total
		Nevoeiro	Não nevoeiro	
O b s e r v a d o	Nevoeiro	Nº de acertos X	Nº de erros E	(L1)
	Não nevoeiro	Nº de erros E	Nº de acertos X	(L2)
	Total	(C ₁)	(C ₂)	(T)

Associado à tabela de Contingência está o “skill score”, definido como se segue, conforme consta no “Manual de Métodos Objetivos de Previsão do Instituto de Proteção ao Voo” (1975):

$$\text{“Skill score”} = \frac{F - D}{T - D} \quad (2.46)$$

onde F é o número total de previsões corretas (nº total de acertos) e T é o número total de previsões realizadas. D é o número que se pode esperar ser correto ao acaso climatológico, baseado na amostra, isto é:

$$D = \frac{(C_1 * L_1) + (C_2 * L_2)}{T}, \quad (2.47)$$

onde C e L são, respectivamente as somas das colunas e linhas da tabela acima.

Portanto:

$$\text{“Skill score”} = \frac{(\text{total de acertos}) - D}{T - D}. \quad (2.48)$$

Esse resultado teria o valor 1, se todas as previsões forem corretas (T no caso), e teria o valor zero, se o total de acertos de previsões for igual ao número que se espera ser correto ao acaso climatológico (no caso, total de acertos = D).

Segundo Ayode (1983), na Climatologia, D é o número esperado que seja correto, caso somente as médias climatológicas fossem usadas. Na Climatologia, conforme cita Ayode (1983), alguns tipos de previsão somente podem ser feitas com a utilização da estatística, como por exemplo nas previsões de tempo a longo prazo.

As previsões de tempo, a longo prazo, sempre fazem comparações com as condições climatológicas normais e é comum fornecer previsões de valores dos elementos em termos dos desvios em relação às normais.

3 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NAS ATIVIDADES AERONÁUTICAS

3.1 A Constituição das Mensagens METAR e TEMP

No que diz respeito à Meteorologia Aeronáutica, cada estação meteorológica de aeródromo, regularmente a cada hora emite uma mensagem que descreve as condições atmosféricas reinantes no momento, em suas pistas de pouso e decolagem. Essa mensagem é destinada aos aeródromos de sua vizinhança, aos órgãos de Controle de Tráfego Aéreo de sua jurisdição e ao BIM – Banco de Informações Meteorológicas, sediado no Centro Regional de Previsão de Área de Brasília. É remetido também a outros bancos de informação e aeródromos internacionais, aos quais possam eventualmente interessar pela sua condição de tempo.

Desse modo, qualquer órgão de Controle de Tráfego Aéreo de qualquer aeródromo pode ficar ciente das condições atmosféricas imediatas de suas pistas e de outras, nacionais e internacionais, mediante consultas ao BIM ou através da recepção preestabelecida de mensagens.

Visando agilizar o Sistema de Proteção ao Vôo, a OACI – Organização de Aeronáutica Civil Internacional padronizou todos os tipos de mensagens utilizadas, tais como: as de Controle de Tráfego Aéreo, de Meteorologia Aeronáutica, de Busca e Salvamento e as emitidas pelos aeronavegantes.

Para fins deste estudo, somente serão abordadas as mensagens METAR e TEMP. A mensagem METAR reporta-se a uma observação meteorológica de superfície e de rotina, para fins aeronáuticos; é elaborada de hora em hora,

embora alguns aeródromos a elaborem de meia em meia hora. Já a mensagem TEMP se refere às condições de temperatura do ar, temperaturas do ponto de orvalho e à direção e velocidade do vento em altitudes; na América do Sul, são transmitidas diariamente às 0000UTC (21 horas, hora de Brasília) e 1200 UTC (9 horas, hora de Brasília) aos centros meteorológicos aeronáuticos nacionais e internacionais.

A mensagem METAR é constituída, ordenadamente, dos seguintes parâmetros:

Tabela 3: Parâmetros da mensagem METAR

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Local	Dia e Hora	Vento	Visibilidade	Alcance visual da pista	Tempo presente	Nebulosidade	Temperatura do ar e do ponto de orvalho	Pressão ao nível do mar para ajuste do altímetro	Informações suplementares

(1) Local: Indicador de localidade estabelecido pela OACI – Organização de Aeronáutica Civil Internacional. Exemplo: SBRJ - Aeroporto de Santos Dumont; SBSP - Aeroporto de Congonhas; SBGR - Aeroporto de Guarulhos; SBFL - Aeroporto de Florianópolis;

(2) Dia e hora: Dia e horário (em horas e minutos) oficiais da observação, seguidos da letra Z (zulu), representando a hora de “Greenwich”. Exemplo: 200900Z – dia 20, observação realizada às 0900 zulu ou 0900 UTC hora de “Greenwich”. 0900 UTC significa 6 horas, hora de Brasília;

(3) Vento: Direção, velocidade e unidade de velocidade do vento:

Direção: É referente ao norte verdadeiro, sendo de 10 em 10 graus inteiros e registrados com três algarismos. Exemplo: 02010KT – vento de 20 graus com 10 nós de velocidade;

Velocidade do vento: É indicada por dois algarismos, seguida da unidade de velocidade, geralmente em “knot” ou “nós”, abreviadamente KT. Exemplo: 26010KT – ventos de 260 graus com 10 nós de velocidade. O vento calmo será codificado como 00000KT;

(4) Visibilidade: Será informada de 50 em 50 metros até 500 metros; de 500 a 5000m, de 100 em 100 metros, e de 5000 a 9999m, de 1000 em 1000 metros. Para a visibilidade de 10Km ou mais, será apresentada, na mensagem, o número 9999. Exemplo: 5000 – visibilidade de 5000 metros; 0150 – visibilidade de 150 metros;

(5) Alcance visual da pista: RVR - “runway visual range”. É usado em aeródromo que operam com pouso e decolagem de precisão, geralmente com Sistema de Pouso por Instrumento, o ILS – “Instrument Landing System”;

(6) Tempo presente: Fenômeno de tempo presente significativo. São alguns exemplos de fenômenos de tempo significativo:

Precipitações:

- **DZ** = nevoeiro (drizzle);
- **RA** = chuva (rain);
- **GR** = granizo (hail);
- **SN** = neve (snow);
- **SG** = grãos de neve (snow grains).

Obscurecedores:

- **FG** = nevoeiro (fog);
- **HZ** = nevoa seca (haze);
- **BR** = nevoa úmida (mist);
- **DU** = poeira (dust).

Outros fenômenos:

- **SHRA** = pancada de chuva leve;
- **TSGR** = trovoada com granizo forte.

(7) Nebulosidade: A quantidade das nuvens é obtida visualmente por estimativa em oitavos e codificadas da seguinte maneira:

- **FEW** = pouco de 1 a 2 oitavos do céu encoberto;
- **SCT** = esparso de 3 a 4 oitavos do céu encoberto;
- **BKN** = nublado de 5 a 7 oitavos do céu encoberto;
- **OVC** = encoberto com 8 oitavos do céu encoberto.

Altura das nuvens: A altura das nuvens será informada em centena de pés. Exemplo: FEW005 – poucas nuvens com base a 500 pés; SCT100CB – nuvens CB esparsas com base a 10000 pés.

Observação: “CAVOK” significa “ceiling and visibility ok” e é utilizado no METAR em substituição à visibilidade, tempo presente e nebulosidade, desde que ocorram simultaneamente as seguintes condições: uma visibilidade de 10km ou mais, nenhuma nebulosidade abaixo de 1.500 metros e sem cumulonimbus, ausência de precipitação, trovoada, tempestades de areia ou poeira, nevoeiro ou qualquer outro fenômeno

atmosférico significativo. Quando não existirem nuvens e CAVOK não for apropriado, usa-se a abreviatura SKC – “sky clear”, isto é céu claro;

(8) Temperatura do ar e do ponto de orvalho: São representadas em graus “Celsius” inteiros;

(9) Pressão ao nível do mar para o ajuste do altímetro: São Informados na unidade hectopascal (hPa) em valores inteiros, com quatro algarismos e precedidos da letra Q;

(10) Informações suplementares: Fenômeno de tempo presente durante a hora precedente. O fenômeno relatado deverá ter ocorrido durante a hora anterior, nunca na hora da observação. Será usada a sigla RE precedendo a abreviatura do fenômeno. Exemplos: RESHRA – precipitação moderada ou forte; RETS – trovoadas.

A mensagem TEMP também possui um formato constante dos dados dispostos em seu texto. Para o estudo de nevoeiro podem ser tratados somente os dados de superfície relativos à temperatura do ar e do ponto de orvalho em °C; à umidade relativa do ar em porcentagem; razão de mistura em g/kg; os dados de 850 hPa (hectopascal) relativos à temperatura e à velocidade do vento para o cálculo do FSI – índice de estabilidade de nevoeiro e, finalmente, a temperatura e pressão do nível de condensação por levantamento. A mensagem TEMP consta no (Anexo 8.1).

Dentre os endereços para a obtenção da mensagem METAR e TEMP na Internet, os mais consultados são:

- a) http://weather.noaa.gov/weather/BR_cc.html, selecionando-se Guarulhos Civ/Mil;

- b) <http://www.met.fsu.edu/weather>, inserindo os seguintes dados: Bulletin type; metar surface observations; Station Identifier; SBGR; Time: back 72 hours, que resultará numa listagem de observações ocorridas nas últimas 72 horas do Aeródromo de Guarulhos;
- c) <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, selecionando América do Sul, clicando em SBMT(Aeródromo do Campo de Marte), para obtenção da mensagem TEMP;
- d) <http://weather.noaa.gov/weather/metar.shtml>, para obtenção de qualquer METAR da hora. Se digitar SBGR conseguirá as informações reinantes da hora do Aeródromo de Guarulhos.

3.2 Rotinas de Previsão de Eventos Meteorológicos

Segundo orientações contidas no “Manual de Métodos Objetivos de Previsão do Instituto de Proteção ao Vôo” (1975), os procedimentos devem seguir os seguintes passos:

- Seleção do evento de tempo significativo que se deseja prever;
- Estabelecimento do período de previsão e da hora-limite;
- Estabelecimento do problema da previsão em termos precisos;
- Relação dos prováveis preditores;
- Coleta e análise dos dados pertinentes;
- Avaliação do sistema de previsão resultante;
- Apresentação dos resultados.

3.2.1 Seleção do evento de tempo significativo para previsão

Aconselha-se selecionar um evento operacionalmente importante para o Sistema de Proteção ao Vôo. Exemplo: nevoeiro, teto ou outros.

3.2.2 Estabelecimento do período de previsão e da hora-limite

Para a hora-limite, é necessário decidir se a previsão deve ser de seis, doze, dezoito ou vinte e quatro horas subsequentes à hora de observação. A hora da observação deve ser obrigatoriamente fixada. Se for necessário emitir uma previsão de nevoeiro ou “stratus” às 16 horas (1900 UTC), a última observação de superfície disponível será a das 15 horas (1800 UTC).

3.2.3 Estabelecimento do problema da previsão em termos precisos

O estabelecimento do problema objeto da previsão em termos precisos constitui um requisito fundamental para a realização da análise. Eventual falha nesse sentido resulta em dificuldades no trato com um grande número de dados, perda de tempo e, de maneira geral, tem-se como consequência o fracasso. O relato preciso de um problema pode ser observado a seguir: Por exemplo, observações disponíveis às 15 horas (1800 UTC), prever a ocorrência de tetos de 300 pés e/ou visibilidades de meio milha ou menos, por duas horas ou mais, no período compreendido entre 16 e 10 horas da manhã do dia seguinte, para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro.

3.2.4 Relação dos prováveis preditores de tempo

Esse passo representa a tentativa inicial para se determinar às condições antecedentes associadas ao evento de tempo a ser estudado. Sabendo-se o que são essas condições antecedentes, certos parâmetros selecionados como descritivos daquelas condições podem ser tentados como preditores. Um conhecimento ou uma conexão física a “priori” dos preditores com o evento específico a ser prognosticado é desejável; porém, em muitos casos ela não é evidente. Preditores pertinentes podem ser sugeridos e selecionados das seguintes fontes; por exemplo:

- Regras de manuseio: em alguns centros meteorológicos, os previsores descobriram que certas condições atmosféricas parecem anteceder a ocorrência de um particular evento de tempo. Quando essas condições estão presentes, o meteorologista leva-as em conta em sua previsão.

Essas idéias, embora difíceis de definir, são consideradas regras de manuseio e podem ser testadas como preditores objetivos. É o caso, por exemplo, do Aeroporto de Porto Alegre, cujos meteorologistas do Centro Meteorológico de Previsão analisam, primeiramente o diagrama termodinâmico “Skew T Log P”, para verificar a distribuição vertical dos valores da umidade e dos ventos na atmosfera. Nesse sentido, Lima (1980, p. 2) afirma que nenhum nevoeiro ocorre de abril a setembro, quando o valor máximo da pressão reduzida ao nível médio do mar, no dia anterior, for menor que 1013 hPa. Ele ainda afirma que o modelo das condições sinóticas favoráveis deve caracterizar-se por uma estabilidade da massa de ar, pela umidade elevada na

camada abaixo de 750 hPa (temperatura do ar menos a temperatura do ponto de orvalho menor ou igual a 6°C) e pelo ar seco acima desse nível. Para complementar, de preferência deve existir uma cobertura de nuvens durante o dia e céu claro e ventos fracos durante a noite.

As condições de estabilidade da massa de ar e a distribuição de umidade com a altura são verificadas através de consultas aos dados das seguintes fontes:

- a) Carta Sinótica de Superfície das 1200 UTC (9 horas, hora de Brasília), na qual deve observar se a posição do sistema de alta pressão e das frentes em relação a Porto Alegre. Com a ocorrência de frente fria atingindo o Rio Grande do Sul ou Santa Catarina não se prevê a formação de nevoeiro. Se existir uma frente fria em outras áreas e a alta pressão estiver no oceano, na altura do Rio Grande do Sul e Santa Catarina verificam-se outros itens;
- b) Diagrama Termodinâmico Skew T Log P das 1200 UTC, no qual se verifica a distribuição de umidade abaixo e acima de 750 hPa, a direção e velocidade do vento nível de 500 hPa;

Procedimentos:

- Verifica-se a direção e velocidade do vento do nível de 500 hPa no diagrama “Skew T Log P” e seguem-se os seguintes passos:
 - Caso a direção seja de noroeste e/ou a velocidade igual ou maior que 50 nós, não se prevê nevoeiro;
 - Caso contrário, verifica-se o perfil da temperatura do ar e do ponto de orvalho no diagrama “Skew T Log P” das 1200 UTC: se

apresentar, abaixo de 750 hPa, uma camada úmida (temperatura do ar menos a do ponto de orvalho menor ou igual a 6 °C) e seca acima de 750 hPa; se a diferença das pressões máximas entre o dia em vigor e o anterior for menor que 4 hPa; e se a tendência de pressão for igual ou menor que 1 hPa entre 1100 e 1300 UTC (entre 8 e 10 horas, hora de Brasília), prevê-se nevoeiro.

Além dessas fontes oficiais, outros fatores também vêm contribuindo para a identificação de preditores de tempo. É o caso da experiência, que a partir da observação diária sugere preditores que eventualmente aparentem conexões com o problema em questão. Nesse sentido, o Centro Meteorológico de Porto Alegre relacionou os seguintes:

- Direção e velocidade vento das 19 horas da superfície;
- Diferença de pressão em 24 horas;
- Temperatura das 19 horas;
- Direção e Velocidade do vento em 500 hPa;
- Depressão do ponto de orvalho (temperatura do ar menos a do ponto de orvalho) das 19 horas;
- Nebulosidade das 19 horas.

Acresce-se ainda, de um modo geral, o aproveitamento de estudos levados a efeito por outros Centros Meteorológicos; eles são testados, modificados e implantados total ou parcialmente.

Hansen (1998, p. 5) também estudou a questão e selecionou a temperatura do ar e a diferença entre a temperatura do ar e o ponto de orvalho ao por do sol

como preditores. Ele utilizou em sua pesquisa sobre previsão de visibilidade e teto (altura da base de nuvens) a lógica difusa.

3.2.5 Coleta e análise dos dados pertinentes

Essa etapa pode ser subdividida em duas fases:

- **Coleta de dados:** para o estudo piloto, os dados são usualmente disponíveis em fontes locais, tais como registros de estação ou registros de escritórios de meteorologia da vizinhança. Para muitos problemas de previsão, o estudo piloto pode ser conduzido a partir de dados atuais. Já para seu refinamento e expansão até o uso operacional são desejáveis dados referentes a um período de 5 a 10 anos. Uma consulta a sumários climatológicos geralmente revela quais os meses a selecionar;
- **Acondicionamento dos dados de uma forma utilizável:** uma vez que os dados necessários tenham sido coletados, o problema seguinte é acondicioná-los e arranjá-los de forma utilizável, em arquivos de programas específicos para o respectivo tratamento ou em “softwares” estatísticos, como por exemplo, Microsoft Excel.

4 MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS

4.1 Base de Dados Utilizada

No estudo, os dados de METAR e TEMP para cálculos das equações de regressão foram recebidos, via Internet, de NOAA – “National Oceanic and Atmospheric Administration”, devidamente tabelados em “Excel”.

Os dados oriundos de NOAA, referentes ao período maio de 1997 a 31 de agosto de 2000, inicialmente foram tratados em linguagem Transact-SQL (T-SQL), com o objetivo de eliminar observações repetitivas e truncadas provenientes da transmissão original de São Paulo ao exterior. Além disso, buscou-se a seleção de arquivo de dados sem precipitação e arquivo de dados com nevoeiro, pois o nevoeiro de radiação se forma com total estabilidade atmosférica. Em todos os arquivos, o FSI – Fog Stability Index foi inserido somente no horário das 0000 UTC (21 horas, hora de Brasília), porque, diariamente, há somente uma sondagem noturna, conseqüentemente o total da amostra para determinação das funções de regressão ficou reduzido a 103 observações.

Os dados de METAR para cálculos de previsão de visibilidade foram obtidos, diariamente, no período de 1 de maio de 2001 a 31 de agosto de 2001, do Departamento de Meteorologia da Universidade da Flórida dos Estados Unidos, através do endereço <http://www.met.fsu.edu/weather>, enquanto que as mensagens TEMP foram conseguidas através de solicitação ao Departamento de Ciência Atmosférica da Universidade de “Wyoming” dos Estados Unidos.

4.2 Método Estatístico Aplicado

4.2.1 Equações estimadas e coeficientes de determinação

Ao aplicar o Método dos Mínimos Quadrados para a obtenção das equações de regressão estimada sobre vários parâmetros, obteve-se as seguintes equações:

- $VIS = 6647 + 92 * FSI - 134 * MIXR,$
- $VIS = 9415 - 345 * Q_HZBR - 233 * Q_CLR,$
- $VIS = 8892 - 433 * Q_HZBR + 77 * DPPO,$

respectivamente, com os coeficientes de determinação múltipla 0,19 , 0,47 e 0,37 , onde:

- VIS é a visibilidade prevista em metros das 0000 UTC (21 horas, hora de Brasília);
- FSI é o índice de estabilidade de nevoeiro, obtido com os dados da mensagem TEMP de SBMT (Aeródromo de Campo de Marte, próximo de Guarulhos), das 0000 UTC, com valores amostrais entre 0 e 79,8;
- MIXR é a razão de mistura em g/kg, extraída da mensagem TEMP de SBMT, das 0000 UTC, com valores amostrais entre 5,84 e 13,20;
- Q_CLR é a quantidade de horas de céu claro entre 0000 a 1200 UTC (entre 21 a 9 horas, hora de Brasília), extraída das mensagens METAR de Guarulhos, com valores amostrais entre 0 e 12;

- Q_HZBR é a quantidade de horas de névoa seca e/ou úmida entre 0000 a 1200 UTC (entre 21 a 9 horas, hora de Brasília), extraída das mensagens METAR de Guarulhos, com valores amostrais entre 0 e 12;
- DPPO é a depressão do ponto de orvalho em °C, isto é, a diferença entre as temperaturas do ar e do ponto de orvalho em °C, extraída da mensagem METAR de Guarulhos, das 0000 UTC (21 horas, hora de Brasília) com valores amostrais entre 0 e 14.

4.2.2 Teste de hipótese para existência de Regressão Linear Múltipla

Estabelecidas as hipóteses dos parâmetros β_i :

$$H_0 : \beta_i = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0$$

os modelos foram testados com nível de significância igual a 5%. Escolhida uma variável F com 2 graus de liberdade no numerador (devido ao uso de duas variáveis independentes) e 100 no denominador. Desta forma, foi possível determinar as regiões de aceitação e crítica com auxílio da tabela de distribuição F. Foi encontrado o valor na tabela de distribuição F:

$$F(2;100) = 3,07. \quad (4.1)$$

Mediante o emprego da análise de regressão, dos arquivos VISxFSIxMIXR, VISxQ_HZBRxQ_CLR e VISxQ_HZBRxDPPO (Anexo 8.2), respectivamente, foram deduzidos os valores de F calculados 13,06 , 46,24 e 31,09. Como os resultados de F calculados são maiores que os da distribuição F, conclui-se

que, com risco de 5% que existem regressões lineares múltiplas, isto é, os modelos podem explicar e prever a visibilidade.

4.2.3 Testes de hipótese dos parâmetros β_i

Uma vez obtida a estimação dos modelos, foi possível determinar a importância de uma ou mais variáveis independentes. Para tanto, foram estabelecidas as hipóteses dos parâmetros β_i :

$$\begin{aligned} H_0 : \beta_i &= 0 \\ H_1 : \beta_i &\neq 0, \end{aligned}$$

associados com as variáveis independentes.

Para as equações do anexo 8.2 foi fixado um erro de 5%, e com o emprego da distribuição t foi obtido:

$$t_{\varphi}(0,025; 100) = 1,940, \quad (4.2)$$

onde φ é igual ao tamanho da amostra menos o número de parâmetros do modelo, ou seja, φ igual a 100.

Os cálculos dos valores

$$t_{cal} = \frac{b_i}{S_{bi}}, \quad (4.3)$$

onde b_i é igual ao coeficiente e S_{bi} o seu desvio padrão, têm os seus resultados fornecidos pelo software Microsoft Excel. Os valores t_{cal} para cada parâmetro dos modelos estão tabelados a seguir (Anexo 8.2):

Tabela 4: Parâmetros de FSI e MIXR

Variáveis Independentes	Coefficientes	Erro Padrão	T _{calc}	T _{tab}
FSI (X ₁)	91,60837156	19,87083329	4,610192749	t _{α/2} = 1,9840
MIXR (X ₂)	-134,1478549	158,2249892	-0,847829761	- t _{α/2} = - 1,9840

Tabela 5: Parâmetros de Q_HZBR e Q_CLR

Variáveis Independentes	Coefficientes	Erro Padrão	T _{calc}	T _{tab}
Q_HZBR (X ₁)	-344,509841	55,060275	-6,256958287	t _{α/2} = 1,9840
Q_CLR (X ₂)	-232,8076067	52,77648	-4,411199986	- t _{α/2} = - 1,9840

Tabela 6: Parâmetros de Q_HZBR e DPPO

Variáveis Independentes	Coefficientes	Erro Padrão	T _{calc}	T _{tab}
Q_HZBR (X ₁)	-432,8162714	55,706624	-7,769565658	t _{α/2} = 1,9840
DPPO (X ₂)	76,69795214	94,962278	0,807667572	- t _{α/2} = - 1,9840

Nota-se que MIXR(X₂) e DPPO(X₂), dos arquivos VISxFSIxMIXR e VISxQ_HZBRxDPPO, têm, respectivamente, os valores:

$$-t_{cal} > -t_{tab} \quad (-0,847829761 > -1,9840) \quad e$$

$$t_{cal} < t_{tab} \quad (0,807667572 < 1,9840), \quad (4.4)$$

conseqüentemente, situados na região crítica (não rejeição de $H_0 : \beta_i = 0$). A evidência estatística é suficiente para concluir que há uma relação insignificante dessas variáveis com a visibilidade.

4.2.4 Intervalos de confiança para os coeficientes β_i

Com 95% de confiança, foram encontrados os seguintes intervalos de confiança para os parâmetros β_i , fornecidos pelo software Microsoft Excel (Anexo 8.2), onde a distribuição t é tomada com 100 graus de liberdade e os valores $t(0,025; 100) = 1,9840$, obtidos da tabela t de Student, conforme tabelas abaixo:

Tabela 7: Intervalos de **FSI** e **MIXR**

Variável	Limite Inferior	Limite superior
FSI (X_1)	52,1852	131,03154
MIXR (X_2)	-448,0618	179,76605

Tabela 8: Intervalos de **Q_HZBR** e **Q_CLR**

Variável	Limite Inferior	Limite superior
Q_HZBR (X_1)	-453,7479	-235,2718
Q_CLR (X_2)	-337,5147	-128,1006

Tabela 9: Intervalos de **Q_HZBR** e **DPPO**

Variável	Limite Inferior	Limite superior
Q_HZBR (X_1)	-543,3366	-322,2959039
DPPO (X_2)	-111,7045	265,1004275

4.2.5 Intervalo de confiança para $E(Y_h)$

Para a referida estimativa foram escolhidos os valores $Q_HZBR = 3$ e $Q_CLR = 2$, respectivamente, a quantidade de horas de névoa seca e/ou úmida e a quantidade de horas de céu claro, para a equação estimada:

$$VIS = 9415 - 345 * Q_HZBR - 233 * Q_CLR. \quad (4.5)$$

Considerando que o arquivo VISxQ_HZBRxQ_CLR está armazenado numa tabela em SQL, os valores matriciais $X'X$ de seus coeficientes foram obtidos com o emprego de um algoritmo desenvolvido na linguagem Transact-SQL (Anexo 8.3). A matriz gerada, denominada $X'X$, resultou nos seguintes valores:

$$X'X = \begin{bmatrix} 102 & 352 & 222 \\ 352 & 2672 & 1320 \\ 222 & 1320 & 2058 \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

sendo que os demais valores para obtenção da matriz inversa $(X'X)^{-1}$ e do intervalo proposto foram calculados através de um algoritmo elaborado em linguagem Turbo C (Anexo 8.4). Obteve-se o seguinte valor:

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0,018524 & -0,002127 & -0,000634 \\ -0,002127 & 0,000792 & -0,000279 \\ 0,000634 & -0,000279 & 0,000733 \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Os valores das variáveis independentes escolhidas, $X_{h1}=Q_HZBR = 3$ e $X_{h2}=Q_CLR = 2$, integraram a matriz:

$$X_h = \begin{bmatrix} 1 \\ X_{h_1} \\ X_{h_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

e a visibilidade prevista igual a:

$$\hat{Y}_h = X'_h b = [1 \ 3 \ 2] \cdot \begin{bmatrix} 9415 \\ -345 \\ -233 \end{bmatrix} = 9415 - 1035 - 466 = 7914, \quad (4.9)$$

e considerando que o quadrado médio de erros (QME) é igual a 3845665,71 (Anexo 8.1), obteve-se o estimador do desvio padrão de \hat{Y}_h dado por:

$$S(\hat{Y}_h) = \sqrt{QME[X'_h(X'X)^{-1}X_h]} = 195,54897, \quad (4.10)$$

e para $1 - \alpha = 0,95$, obteve-se $t(0,025; 100) = 1,9840$ da distribuição t. Portanto a estimativa média da variável dependente visibilidade alcançou o seguinte intervalo:

$$7914 - (1,9840 * 195,55) \leq E(Y_h) \leq 7914 + (1,9840 * 195,55)$$

isto é:

$$7526 \leq E(Y_h) \leq 8302.$$

Conclui-se com 95% de confiança que a estimativa média da visibilidade das 0000 UTC (21 horas, hora de Brasília) com 3 horas de névoa seca e/ou úmida e com 2 horas de céu claro, estará entre 7526 e 8302 metros.

4.3 Método Meteorológico Aplicado

No estudo de caso, objeto dessa pesquisa, foram submetidas as rotinas contidas no “Manual de Métodos Objetivos de Previsão do Instituto de Proteção ao Vôo”, cujos procedimentos constituíram o ponto de partida para o desenvolvimento do método proposto.

4.3.1 Seleção do evento de tempo significativo para previsão

O nevoeiro no Aeródromo de Guarulhos configura-se, basicamente, como nevoeiro de radiação, estando associado geralmente a sistema atmosférico de alta pressão. Em função disso, o tipo de nevoeiro selecionado para a

elaboração deste trabalho foi o de radiação, levando-se em conta, normalmente, a frequência com que ocorre.

4.3.2 Estabelecimento do período de previsão e da hora-limite

O tempo operacional definido compreendeu o período de 0100 UTC às 1200 UTC (de 22 às 9 horas, hora de Brasília) e para a emissão da previsão a hora-limite determinada foi 0000 UTC (21 horas, hora de Brasília). Optou-se por esse período, porque antes de 0100 UTC o meteorologista já está de posse das mensagens para extração dos parâmetros meteorológicos de interesse.

4.3.3 Estabelecimento do problema de previsão em termos precisos

Considerado como nevoeiro o momento em que a visibilidade horizontal da pista for inferior a 1000m e seu término ou dissipação, quando a visibilidade for igual ou superior a 1000. Tais informações foram obtidas das mensagens METAR do Aeródromo de Guarulhos.

4.3.4 Relação dos preditores

Os preditores selecionados, abaixo relacionados, foram obtidos de um arquivo geral de METAR do Aeródromo de Guarulhos, em “Excel” , cedidos pela NOAA – “National Oceanic and Atmospheric Administration” dos Estados

Unidos da América, enquanto que as mensagens TEMP foram obtidas do Departamento de Ciência Atmosférica da Universidade de Wyoming dos Estados Unidos, através do endereço <http://weather.uwyo.edu/upprair/sounding.html>.

Da mensagem METAR de Guarulhos das 0000 UTC, foram selecionados os seguintes parâmetros para o cálculo do preditor depressão do ponto de orvalho:

- Temperatura do ar em °C;
- Temperatura do Ponto de Orvalho em °C.

Da mensagem TEMP do Aeródromo do Campo de Marte, das 0000 UTC, do nível de 850 hPa, foram escolhidos os seguintes parâmetros para obtenção do preditor FSI:

- Temperatura do ar em °C;
- Velocidade do vento.

Da mensagem TEMP do Aeródromo do Campo de Marte, das 0000 UTC, do nível da superfície foi selecionado o preditor razão de mistura em g/kg.

Resumindo, foi possível definir os seguintes preditores:

- Quantidade de horas de névoas úmida e/ou seca;
- Quantidade de horas de céu claro e/ou somente nuvens acima de 20000 pés;
- Depressão do Ponto de Orvalho em °C (diferença entre a temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho);
- Razão de mistura;

- FSI – Índice de estabilidade de nevoeiro (com o emprego dos parâmetros temperaturas do ar e do ponto de orvalho da superfície e temperatura e velocidade do vento do nível de 850 hPa).

5 RESULTADOS

5.1 Análise Estatística

Foram analisados os trabalhos realizados por Trigg (2000), do Instituto de Tecnologia da Força Aérea dos Estados Unidos, que estudou o uso da regressão linear de vários parâmetros, como: umidade relativa do ar, a pressão e a temperatura do nível de condensação por levantamento, inserindo ainda o FSI preconizado por Wantuch (2000).

Em função dos dados disponíveis para a geração das equações estimativas, foram somente utilizados os parâmetros FSI, MIXR, Q_CLR, DPPO e Q_HZBR, respectivamente, índice de estabilidade de nevoeiro, razão de mistura, quantidade de horas de céu claro, depressão do ponto de orvalho e quantidade de horas de névoa seca e/ou úmida, originando as seguintes equações mencionadas no (Anexo 8.1):

- $VIS = 6647 + 92 * FSI - 134 * MIXR$;
- $VIS = 8892 - 433 * Q_HZBR + 77 * DPPO$;
- $VIS = 9415 - 345 * Q_HZBR - 233 * Q_CLR$.

Porém as equações $VIS=6647+92*FSI-134*MIXR$ e $VIS=8892-433*Q_HZBR+77*DPPO$ foram excluídas do estudo por terem apresentadas as hipóteses de não rejeição de $H_0 : \beta_i = 0$ para os parâmetros razão de mistura (MIXR) e depressão do ponto de orvalho (DPPO), restando somente o modelo que envolvem a quantidade de horas de névoa úmida e/ou seca e a quantidade

de horas de céu claro para prosseguimento do estudo em questão. Referente a equação $VIS=9415-345*Q_HZBR-233*Q_CLR$, resultou em um coeficiente de determinação igual a 0,47, o que expressa a porcentagem de variação da visibilidade explicada pela equação de regressão escolhida.

5.2 Análise Meteorológica

O índice utilizado no trabalho foi o FSI – “Fog Stability Index”, utilizado e pesquisado por Wantuch (2000) no Serviço Meteorológico Aeronáutico da Hungria, sediado no Aeroporto de Budapeste, o que consiste na utilização de temperaturas do ar e do ponto de orvalho da superfície, temperatura e velocidade do vento no nível de 850 hPa. É obtido pela aplicação da seguinte equação: $FSI= 4*TS -2*(T850 + TDS) + W850$, onde TS, T850, TDS E W850, que representa, respectivamente, a temperatura do ar da superfície, a temperatura no nível de 850 hPa, a temperatura do ponto de orvalho na superfície, em graus centígrados, e a velocidade do vento no nível de 850 hPa em nós.

Conforme estudos de Lefever (1997), Trigg (2000) e Wantuch (2000), se o valor de FSI for maior que 55, considera-se baixa a possibilidade de ocorrência de nevoeiro de radiação; entre 31 e 55, uma moderada possibilidade e, finalmente, quando menor que 31, existe uma alta possibilidade de sua ocorrência.

O resultado isolado do FSI não assegurou resultados convincentes, quando se aproxima dos limites intervalares mencionados. Wantuch (2000), em seus

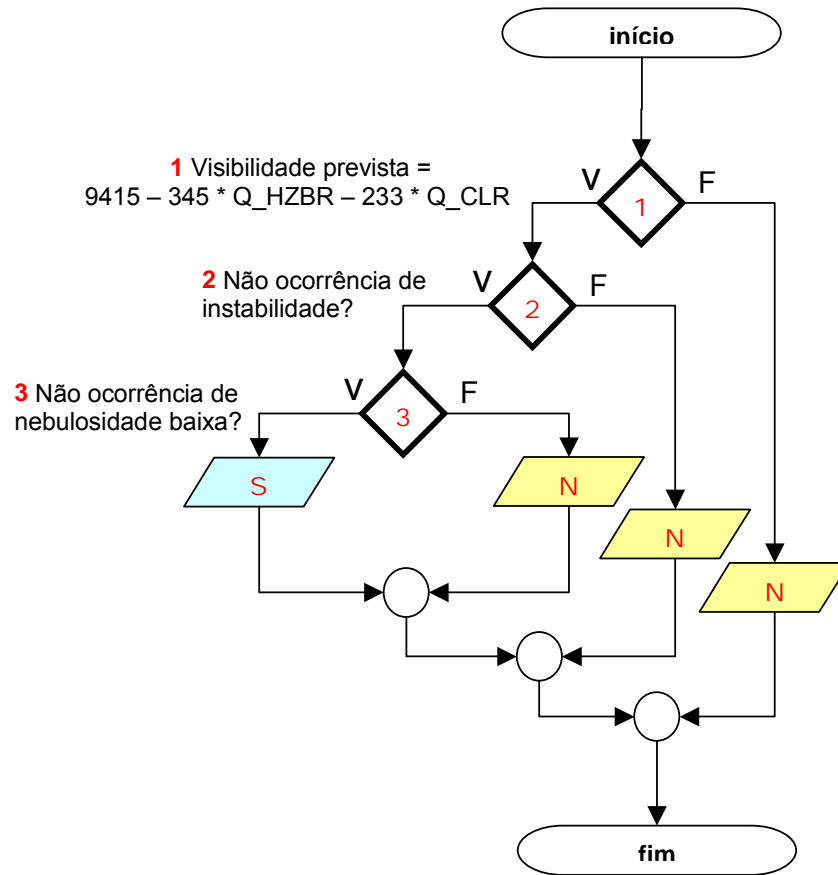
estudos de nevoeiro do Aeroporto de Budapeste, também alerta para valores limítrofes aos intervalos selecionados do FSI. Conseqüentemente a equação estimada $VIS=9415-345*Q_HZBR-233*Q_CLR$ foi a única, exaustivamente, submetida a testes, com emprego de um arquivo de dados METAR de 1 de maio a 31 de agosto de 2001 do Aeródromo de Guarulhos, com o objetivo de validá-la ou não. Fez-se uso do “Microsoft SQL Server” para o cálculo dos valores previstos mencionados no (Anexo 8.2).

Para ampliar a análise, utilizou-se de recursos de fluxograma de decisões, envolvendo a equação selecionada, a verificação da presença ou não de instabilidade ou nebulosidade baixa, considerando que o nevoeiro de radiação se forma diante de total estabilidade e predominância de céu claro ou somente da presença de nuvens acima de 25000 pés, reinante no momento, para tomar a decisão sobre a ameaça ou não de ocorrência de nevoeiro.

5.2.1 Fluxo de decisão para previsão de nevoeiro

Trigg (2000), do Instituto de Tecnologia da Força Aérea dos Estados Unidos, chegou a conclusão em seus estudos que se a visibilidade prevista das 0000 UTC (21 horas, hora de Brasília) for menor que 8000 metros é prognosticada a ocorrência de nevoeiro. De posse dessa informação e da equação estimada foi possível delinear o fluxo de decisão.

Figura 23: Fluxo de decisão para previsão de nevoeiro de radiação.



O fluxograma em questão deverá ser executado segundo os passos mencionados a seguir.

Passo A

Obtenção de Dados:

Q_CLR – Quantidade de horas de céu claro e/ou somente nuvens da camada mais alta acima de 25000 pés ocorridas no período de 12 horas passadas a contar de 0000 UTC, extraída das mensagens METAR do Aeródromo de Guarulhos.

Q_HZBR – Quantidade de horas ocorridas de névoa seca e/ou úmida no período de 12 horas passadas a contar de 0000 UTC, extraída das mensagens METAR do Aeródromo de Guarulhos. Trigg (2000) utilizou esses parâmetros como preditores em suas equações de regressão linear simples.

$$\text{Visibilidade prevista} = 9415 - 345 * Q_HZBR - 233 * Q_CLR$$

1- Se a visibilidade prevista for menor que 8000 vá para o passo B, caso contrário não prevê nevoeiro de radiação e pare de executar o fluxo.

Passo B

Obtenção de dados:

Análise das mensagens METAR do Aeródromo de Guarulhos das 0000 UTC (21 horas, hora de Brasília) e de 12 horas passadas para verificação da ocorrência ou não de instabilidade no período.

2 – Se não ocorreu chuva, chuveiro, pancada de chuva ou trovoadas vá para o PASSO C, caso contrário não prevê nevoeiro de radiação e pare de executar o fluxo.

Passo C

Obtenção de dados:

Análise do METAR do Aeródromo de Guarulhos das 0000 UTC (21 horas, hora de Brasília) para verificação da ocorrência ou não de nebulosidade baixa (abaixo de 2000 pés).

3- Se não ocorreu nebulosidade baixa então prevê nevoeiro de radiação, caso contrário não.

Observações:

- a) As informações sobre alturas da camada de nuvens são reportadas nas mensagens METAR em centenas de pés. Exemplo: SCT015, BKN010 e OVC016 correspondem, respectivamente, aos seguintes valores: 1500, 1000 e 1600 pés;
- b) Significado de FEW, SCT, BKN e OVC na nebulosidade:
 - FEW: pouca nebulosidade;
 - SCT: nebulosidade esparsa;
 - BKN: nublado;
 - OVC: encoberto.

De posse da seleção da equação de regressão, das análises estatística e meteorológica efetuadas é possível a elaboração dos escores de acertos e erros da previsão de nevoeiro de radiação.

5.2.2 Escores de resultados da previsão de nevoeiro de radiação

A análise resultou do seguinte quadro demonstrativo de acertos e erros, testados sobre os valores dos arquivos de METAR e TEMP de 1 de maio de 2001 a 31 de agosto de 2001, onde foram levados em consideração as observações de Trigg (2000), que se a visibilidade prevista for menor que 8000 metros há previsão de nevoeiro de radiação e do resultado do fluxo de decisões.

Tabela 10: Escores de Resultados na Tabela de Contingência.

		Previsto		
		Nevoeiro	Não nevoeiro	TOTAL
O b s e r v a d o	Nevoeiro	Nº de acertos 7 (F)	Nº de erros 0	7 (L1)
	Não nevoeiro	Nº de erros 3	Nº de acertos 63 (F)	66 (L2)
	Total	10 (C ₁)	63 (C ₂)	73 (T)

Conforme a equação 2.46, descrita anteriormente, o “Skill score” obtido tem o seguinte valor:

$$\text{“Skill score”} = \frac{F - D}{T - D}$$

onde F é o número total de previsões corretas (nº total de acertos) =70, T é o número total de previsões realizadas=73 e D é o número que se pode esperar ser correto ao acaso climatológico=57,91, valor obtido da equação 2.47:

$$D = \frac{(C_1 * L_1) + (C_2 * L_2)}{T},$$

então

$$D = \frac{(10 * 7) + (63 * 66)}{73} = \frac{70 + 4158}{73} = \frac{4228}{73} = 57,91 .$$

Portanto, "Skill score" baseada na tabela acima é:

$$\text{"Skill score"} = \frac{(63 + 7) - 57,91}{73 - 57,91} = \frac{12,09}{15,09} = 0,80 .$$

Esse resultado teria o valor 1, se todas as previsões tivessem sido corretas (73 no caso), e teria o valor zero, se o número correto de previsões tivesse sido igual ao número que se espera ser correto ao acaso climatológico (57,91 no caso). O score alcançado foi de 80%, o que é considerado um ótimo resultado.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O objetivo geral deste trabalho foi delinear um método estatístico baseado no emprego de equações de regressão linear múltipla, como auxílio à previsão de nevoeiro de radiação para o Aeródromo de Guarulhos e foi plenamente alcançado. Para tanto visou buscar equações de regressão cujos parâmetros meteorológicos são favoráveis à formação de nevoeiro de radiação. Mediante análises estatística e meteorológica criteriosas, as equações foram definidas e determinados os seus respectivos coeficientes de determinação, bem como a realização de testes de hipóteses de seus parâmetros, visando a validação ou não dos modelos de regressão e análise da qualidade de seus ajustamentos. Das três equações analisadas somente uma foi a escolhida, trata-se da função de regressão amostral $VIS = 9415 - 345 * Q_HZBR - 233 * Q_CLR$, sendo que VIS representa a visibilidade prevista, Q_HZBR a quantidade de horas de névoa seca e/ou úmida e Q_CLR a quantidade de horas de céu claro. Referida equação, quando submetida, exaustivamente, a testes de previsão, surtiu ótimos resultados, perfazendo um total de 80% de acertos.

Um óbice à elaboração da pesquisa foi a dificuldade para aquisição das informações METAR de anos anteriores do Aeródromo de Guarulhos, sendo considerada a grande causa da demora para concretizar o trabalho. Para não inviabilizar o intento, recorreu-se a bancos de dados meteorológicos dos Estados Unidos para obtenção dos dados do Aeródromo de Guarulhos.

O estudo exigiu razoáveis conhecimentos de Informática, Estatística e de Meteorologia, conforme se pode inferir do corpo do trabalho. E isso se fez mediante um planejamento aplicado desses conhecimentos à concepção, implementação e validação do trabalho.

6.2 Recomendações

Um método estatístico no auxílio de previsão de nevoeiro para o Aeroporto de Guarulhos, proporciona ao previsor de serviço uma excelente ferramenta na tomada de decisão, porém o trabalho em questão ficou restrito somente aos meses de maio a agosto por ter sido escolhido o período de maior incidência do nevoeiro de radiação.

Experiências em estudos de previsão de nevoeiro ainda são insipientes. No entanto, a rapidez com que a tecnologia evolui tem despertado pesquisas nessa área. Estudos de redução de visibilidade e teto (altura da camada mais baixa de nuvens) têm-se beneficiados do emprego da inteligência artificial. Assim sendo, após o desenvolvimento do presente estudo, recomenda-se:

- Estender o referido estudo a outros tipos de nevoeiro, na busca de suas respectivas equações de regressão linear múltipla, preferencialmente abrangendo mais de duas variáveis independentes;
- Requisitar ao estudo um grande volume de dados históricos, preferencialmente acima de cinco anos, procedente de órgãos públicos detentores das informações METAR e TEMP, essenciais à pesquisa;

- Realizar, periodicamente, avaliações do emprego da função de regressão amostral, se porventura ocorrer a sua implantação nas rotinas de trabalho do Sistema de Proteção ao Vôo;
- Realizar análise de variância de amostras de vários anos, do período de maio a agosto, e gerar suas funções de regressão para avaliação, homologação e implantação no Sistema de Proteção ao Vôo, se for o caso;
- Estudar e analisar o trabalho editado por Hruschka (1999) cujo título é “Extração de Regras de Redes Neurais por meio do Algoritmo RX Modificado: Um Exemplo de Aplicação em Modelagem de Dados Meteorológicos” e aplica-lo, se for o caso. Tal pesquisa consiste em gerar previsões de nevoeiro, névoas úmida e seca para o Aeródromo do Galeão (Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro – Antonio Carlos Jobim). A pesquisa de Hruschka (1999) foi apresentada no IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais em julho de 1999, realizado no ITA – Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Contém inúmeras regras, envolvendo o uso de vários parâmetros extraídos das mensagens METAR do Aeródromo do Galeão. Referido trabalho científico pode ser acessado na Internet pelo endereço http://www.ele.ita.cta.br/cnrm/artigos-4cbrn/4cbrn_013.pdf.
- Pesquisar o trabalho realizado por Hansen (1998), sobre o emprego de lógica difusa para previsão de visibilidade e teto baixos e efetuar um estudo de viabilidade com o objetivo de estender e adaptar, nessa

pesquisa, os critérios intervalares de previsão de nevoeiro do FSI – Fog Stability Index, preconizado por Wantuch (2000).

- Modelação da duração de nevoeiro é também, por si só, motivo de outro tipo de pesquisa que utilizam o ajustamento do modelo de regressão exponencial e do processo de Poisson. Um trabalho dessa natureza foi elaborado por Reis (1995), de Portugal, intitulado “Nevoeiro no Aeroporto de Portela: modelação da duração”, fruto de sua dissertação apresentada para obtenção do grau mestre em Probabilidade e Estatística no Departamento de Estatística e Investigação Operacional da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Finalmente, todo e qualquer estudo nesta área é digno de atenção, uma vez que seus resultados proporcionam mais um passo à perfeição da navegação aérea.

7 FONTES BIBLIOGRÁFICAS

CABRAL, Edson. **Climatologia dos Nevoeiros no Aeroporto de Guarulhos**. São Paulo: SIPAER, 1998.

CONSTANTINO, Carlos. **Meteorologia Descritiva**. Buenos Aires: Editorial Sopena Argentina, S.R.L, 1942.

DIRETORIA DE ELETRÔNICA E PROTEÇÃO AO VÔO. **Manual Auxiliar de Rotas Aéreas. MMA 63-5**. Rio de Janeiro: Divisão de Cartografia e Informações Aeronáuticas, 1981.

FUELBERG, Henry. **Joining regional studies: sea breeze - induced convection, cloud-to-ground lightning, hail detection, fog forecasting, studies of the planetary boundary layer**. Disponível na Internet. <http://www.comet.ucar.edu/outreach/9786993.htm>. 25 de maio de 2001.

HANSEN, Bjarne. **Analog forecasting of ceiling and visibility using fuzzy sets**. Disponível na Internet. <http://www.chebucto.ns.ca/~bjarne/ams2000>. 22 de maio de 2000.

INSTITUTO DE PROTEÇÃO AO VÔO. **Manual de métodos objetivos de previsão**. São José dos Campos: IPV, 1975.

INSTITUTO DE PROTEÇÃO AO VÔO. **Manual Técnico OP-24: Técnicas Gerais de Análise Meteorológica**. São José dos Campos: IPV, 1977.

LEFEVERS, Jodi; LEAH White. **Radiation fog algorithm**. Disponível na Internet. <http://www.srh.noaa.gov/mrx/research/Fog/aisrept.htm>

LEVINE, David M.; BERENSON Mark L.; STEPHAN David. **Estatística: Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

LIMA, José Soares. **Previsão de Ocorrência e Duração de Nevoeiro em Porto Alegre Método Objetivo**. Ministério da Aeronáutica. IPV, 1980

MARTINS, Gilberto de Andrade. **Estatística Geral e Aplicada**. São Paulo: Atlas, 2001.

MAZE, James. **Weather Observations**. E-mail jmaze@ncdc.noaa.

- MEDINA, Mariano. **Meteorologia Básica Sinóptica**. Madrid: Paraninfo, 1976.
- MILONE, Giuseppe; ANGELINI, Flávio. **Estatística Aplicada**. São Paulo: Atlas, 1995.
- MOTA, Fernando Silveira. **Meteorologia Agrícola**. São Paulo: Nobel, 1983.
- NAYA, Antonio. **Meteorologia Superior**. Madrid: Espasa-Calpe, 1984.
- REIS, Marília Cristina de Souza Antunes. **Nevoeiro no Aeroporto da Portela**. Lisboa: 1995. 127p. Dissertação para obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-graduação em Probabilidade e Estatística-Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- SAUCIER, Walter Saucier. **Princípios de Análise Meteorológica**. São Paulo: Ao Livro Técnico, 1969.
- TRIGG, Jimmie Lee. **A study of morning fog formation**. Ohio: Air Force Institute of Technology USAF, 2000. acesso <http://www.google.com> (versão texto) <http://www.au.af.mil/au/database/projects/ay2000/afit/afit-gm-enp-00m-14.pdf>.
- TRIOLA Mário F. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1999.
- TUBELIS, Antonio; NASCIMENTO, Fernando José Lino. **Meteorologia Descritiva**. São Paulo: Nobel, 1980.
- VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Meteorologia e Climatologia**. Brasília: Pax, 2001
- WANTUCH, Ferenc. **Visibility and fog forecasting based on decision tree method**. Hungarian Meteorological Service. E-mail Wantuch.f@met.hu.
- WILKS, Daniel S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. San Diego, Califórnia: Academic Press, 1995.
- AZEVEDO, Paulo Roberto Medeiros. **Modelos de Regressão Linear**. Natal: EDUFRN – Editora da UFRN, 1997.
- ANDERSON, David R.. **Estatística Aplicada à Administração e Economia**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning., 2002.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Manual de Análise do Diagrama SKEW T LOG P** – MMA DR 105 07. Rio de Janeiro: DRA, 1969.

8 ANEXOS

8.1 Mensagem TEMP

Observação: Os dados de interesse para o estudo de nevoeiro estão destacados em negrito.

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1000.0	202									
942.0	722	20.0	9.0	49	7.70	160	2	298.2	321.0	299.6
925.0	878	19.2	9.2	52	7.95	140	6	298.9	322.6	300.4
902.0	1094	17.4	8.4	55	7.72	116	8	299.2	322.2	300.6
850.0	1601	16.6	5.6	48	6.75	60	14	303.5	324.1	304.8
839.0	1712	16.6	3.6	42	5.94	53	13	304.6	322.9	305.8
802.0	2091	14.6	-3.2	29	3.77	30	10	306.5	318.4	307.2
716.0	3044	9.6	-20.4	10	1.06	76	21	311.1	314.8	311.3
705.0	3172	10.0	-26.0	6	0.66	82	23	312.9	315.2	313.0
700.0	3231	9.6	-26.4	6	0.64	85	23	313.1	315.4	313.2

Temp [K] of the Lifted Condensation Level: 279.71

Pres [hPa] of the Lifted Condensation Level: 791.04

Legenda:

PRES – Pressão em hPa (no nível de 850 hPa);

TEMP – Temperatura do ar em °C;

DWPT – Temperatura do ponto de orvalho;

RELH – Umidade relativa do ar em porcentagem;

MIXR – Razão de mistura em g/kg;

SKNT – Velocidade do vento em nós no nível de 850 hPa.

8.2 Equações de Regressão

Vis(y)	FSI(x ₁)	MIXR(x ₂)	yX ₁	yX ₂	X ₁ X ₂	X ₁ ²	X ₂ ²	y ²
9.999	10	10,81	95990,40	108085,27	103,77	92,16	116,85	99980001
3.500	9	13,21	32200,00	46218,81	121,49	84,64	174,38	12250000
7.000	18	10,19	126000,00	71321,37	183,40	324,00	103,81	49000000
9.999	42	10,18	419958,00	101774,05	427,49	1764,00	103,60	99980001
7.000	12	11,56	86800,00	80895,50	143,30	153,76	133,55	49000000
8.000	32	10,79	252800,00	86302,48	340,89	998,56	116,38	64000000
9.999	16	12,36	159984,00	123610,50	197,80	256,00	152,83	99980001
6.000	25	12,39	150000,00	74324,72	309,69	625,00	153,45	36000000
9.999	35	9,53	351964,80	95304,51	335,51	1239,04	90,85	99980001
7.000	47	10,18	330400,00	71248,96	480,42	2227,84	103,60	49000000
9.999	32	10,11	317968,20	101055,80	321,39	1011,24	102,14	99980001
9.999	40	7,70	395960,40	76949,22	304,75	1568,16	59,22	99980001
9.999	7	11,53	67993,20	115319,91	78,43	46,24	133,01	99980001
7.000	19	11,57	130200,00	80977,49	215,17	345,96	133,82	49000000
8.000	19	10,85	148800,00	86827,75	201,87	345,96	117,80	64000000
9.999	24	11,63	241975,80	116259,72	281,38	585,64	135,19	99980001
8.000	32	12,44	257600,00	99504,76	400,51	1036,84	154,71	64000000
9.999	38	10,12	377962,20	101157,78	382,41	1428,84	102,35	99980001
9.999	14	10,13	143985,60	101259,97	145,83	207,36	102,56	99980001
9.999	36	8,25	357964,20	82535,83	295,51	1281,64	68,14	99980001
9.999	29	8,26	287971,20	82618,80	237,97	829,44	68,27	99980001
9.999	16	9,47	159984,00	94727,44	151,58	256,00	89,75	99980001
9.999	19	8,88	191980,80	88754,84	170,43	368,64	78,79	99980001
4.500	18	10,84	82800,00	48791,12	199,50	338,56	117,56	20250000
9.999	55	10,19	551944,80	101877,49	562,42	3047,04	103,81	99980001
9.999	30	5,88	295970,40	58786,52	174,03	876,16	34,57	99980001
9.999	23	8,29	233976,60	82868,71	193,93	547,56	68,69	99980001
9.000	23	8,29	210600,00	74589,29	193,93	547,56	68,69	81000000
4.000	22	11,56	88800,00	46226,00	256,55	492,84	133,55	16000000
9.000	28	10,81	248400,00	97286,47	298,35	761,76	116,85	81000000
9.999	34	7,25	341965,80	72502,93	247,98	1169,64	52,58	99980001
9.999	22	7,74	215978,40	77414,34	167,23	466,56	59,94	99980001
7.000	26	9,47	184800,00	66315,84	250,11	696,96	89,75	49000000
5.000	19	9,50	95000,00	47512,30	180,55	361,00	90,30	25000000
9.999	33	9,48	331966,80	94823,13	314,84	1102,24	89,93	99980001
9.999	36	9,48	357964,20	94823,13	339,50	1281,64	89,93	99980001
9.999	35	8,85	347965,20	88486,67	307,96	1211,04	78,31	99980001
9.999	31	10,11	309969,00	101055,80	313,30	961,00	102,14	99980001
9.999	42	10,84	423957,60	108413,86	459,72	1797,76	117,56	99980001
4.500	24	10,13	108900,00	45571,55	245,07	585,64	102,56	20250000
4.500	22	10,81	97200,00	48643,24	233,49	466,56	116,85	20250000
3.000	23	10,16	68400,00	30473,38	231,60	519,84	103,18	9000000
3.500	24	10,15	84700,00	35516,29	245,57	585,64	102,97	12250000
4.000	12	10,18	48800,00	40713,69	124,18	148,84	103,60	16000000
9.999	27	8,89	269973,00	88934,53	240,15	729,00	79,11	99980001
4.500	22	9,51	97200,00	42804,40	205,46	466,56	90,48	20250000
3.000	12	8,89	36000,00	26656,04	106,62	144,00	78,95	9000000
7.000	18	8,89	124600,00	62197,44	158,16	316,84	78,95	49000000
7.000	25	10,12	177800,00	70817,53	256,97	645,16	102,35	49000000
5.000	5	10,15	26000,00	50737,56	52,77	27,04	102,97	25000000
9.999	47	10,90	465953,40	108965,98	507,83	2171,56	118,76	99980001
3.500	25	8,28	86100,00	28977,73	203,67	605,16	68,55	12250000
9.999	28	9,51	283971,60	95111,37	270,14	806,56	90,48	99980001
9.999	51	10,19	505949,40	101877,49	515,55	2560,36	103,81	99980001
9.999	15	10,12	151984,80	101157,78	153,78	231,04	102,35	99980001
6.000	35	8,25	212400,00	49526,45	292,21	1253,16	68,14	36000000
4.500	30	8,82	135000,00	39703,02	264,69	900,00	77,84	20250000
4.000	5	10,13	20800,00	40508,04	52,66	27,04	102,56	16000000
9.999	23	8,84	227977,20	88397,64	201,57	519,84	78,16	99980001
9.999	5	10,12	49995,00	101157,78	50,58	25,00	102,35	99980001
5.000	28	10,13	140000,00	50635,05	283,56	784,00	102,56	25000000
9.999	31	10,10	309969,00	100954,02	312,99	961,00	101,94	99980001
9.999	31	7,20	313968,60	71994,12	226,08	985,96	51,84	99980001
2.500	13	10,12	33500,00	25291,97	135,56	179,56	102,35	6250000
9.999	26	8,25	263973,60	82535,83	217,92	696,96	68,14	99980001
8.000	26	8,85	211200,00	70796,41	233,63	696,96	78,31	64000000

Vis(y)	FSI(x ₁)	MIXR(x ₂)	yX ₁	yX ₂	x ₁ x ₂	x ₁ ²	x ₂ ²	y ²
4.500	11	9,48	50400,00	42674,68	106,21	125,44	89,93	20250000
9.999	21	8,87	207979,20	88665,27	184,44	432,64	78,63	99980001
9.999	54	8,30	539946,00	83036,15	448,44	2916,00	68,96	99980001
5.000	20	7,74	98000,00	38711,04	151,75	384,16	59,94	25000000
5.000	16	8,89	79000,00	44471,71	140,53	249,64	79,11	25000000
4.000	20	10,18	81600,00	40713,69	207,64	416,16	103,60	16000000
9.999	43	5,84	429957,00	58433,66	251,29	1849,00	34,15	99980001
9.999	40	6,69	403959,60	66921,89	270,39	1632,16	44,79	99980001
9.999	31	7,19	313968,60	71922,01	225,86	985,96	51,74	99980001
4.000	27	8,25	109600,00	33017,63	226,17	750,76	68,14	16000000
9.999	17	8,83	169983,00	88308,78	150,14	289,00	78,00	99980001
2.500	28	7,22	71000,00	18054,63	205,10	806,56	52,16	6250000
1.200	0	8,30	0,00	9955,28	0,00	0,00	68,82	1440000
6.000	12	10,83	74400,00	64988,97	134,31	153,76	117,32	36000000
2.000	0	10,85	800,00	21706,94	4,34	0,16	117,80	4000000
2.000	16	10,14	32000,00	20274,50	162,20	256,00	102,76	4000000
3.500	15	8,87	53200,00	31035,95	134,78	231,04	78,63	12250000
9.999	29	13,19	289971,00	131906,25	382,57	841,00	174,03	99980001
9.999	20	12,39	201979,80	123862,14	250,23	408,04	153,45	99980001
9.999	33	8,87	329967,00	88665,27	292,62	1089,00	78,63	99980001
9.999	55	6,79	551944,80	67938,72	375,06	3047,04	46,17	99980001
7.000	21	9,45	144200,00	66182,26	194,76	424,36	89,39	49000000
9.999	16	7,77	163983,60	77649,01	127,36	268,96	60,31	99980001
9.999	34	7,25	341965,80	72502,93	247,98	1169,64	52,58	99980001
7.000	19	10,82	133000,00	75743,78	205,59	361,00	117,08	49000000
6.000	18	10,14	106800,00	60823,51	180,44	316,84	102,76	36000000
9.000	18	7,73	165600,00	69609,75	142,31	338,56	59,82	81000000
9.999	18	9,52	177982,20	95207,85	169,49	316,84	90,66	99980001
6.000	22	11,60	134400,00	69620,96	259,92	501,76	134,64	36000000
9.999	80	7,28	797920,20	72796,93	580,98	6368,04	53,00	99980001
9.999	29	8,89	285971,40	88934,53	254,38	817,96	79,11	99980001
6.000	32	7,72	189600,00	46313,28	243,92	998,56	59,58	36000000
9.999	25	5,84	251974,80	58375,27	147,12	635,04	34,08	99980001
7.000	12	7,73	84000,00	54140,91	92,81	144,00	59,82	49000000
8.000	13	8,29	107200,00	66301,60	111,06	179,56	68,69	64000000
7.000	26	8,85	179200,00	61946,86	226,55	655,36	78,31	49000000
9.999	21	6,72	205979,40	67190,06	138,43	424,36	45,15	99980001
792.149	2.597	971,72	21520250,60	7388070,06	23940,50	81559,92	9421,06	6832420051

DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Y _m	7.690,77
X _{1m}	25,21
X _{2m}	9,43
S _y	1.548.866,88
S _{y2}	-85.164,50
S ₁₁	16.090,31
S ₁₂	-558,04
S ₂₂	253,77
S _{yy}	740.186.670,41
b ₂	-134,15
b ₁	91,61
VT	740.186.670,41
VE	153.313.807,57
VR	586.872.862,83
R ²	0,19
a	6.646,74

Análise de Regressão

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Quadrados médios	Teste F (F calculado)
Devido às variáveis X ₁ e X ₂	153313807,57	2	76656903,79	13,06
Residual	586872862,83	100	5868728,63	
Total	740186670,41	102		

Equação estimada

$$Y_{\text{prev}} = 6.647 + 91,61 X_1 + (-134,15) X_2$$

RESUMO DOS RESULTADOS

<i>Estadística de regressão</i>	
R múltiplo	0,4551138
R-Quadrado	0,207128571
R-quadrado ajustado	0,191271143
Erro padrão	2422,545898
Observações	103

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	153313807,6	76656903,79	13,06192681	9,123E-06
Resíduo	100	586872862,8	5868728,628		
Total	102	740186670,4			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	95% <i>inferiores</i>	95% <i>superiores</i>
Interseção	6646,736695	1717,319593	3,87041336	0,000193819	3239,6231	10053,85
FSI(x1)	91,60837156	19,87083329	4,610192749	1,19136E-05	52,1852	131,03154
MIXR(x2)	-134,1478549	158,2249892	-0,847829761	0,398557517	-448,06176	179,76605

Vis(y)	Q_HZBR(x ₁)	Q_CLR(x ₂)	yx ₁	yx ₂	x ₁ x ₂	x ₁ ²	x ₂ ²	y ²
9.999	1	0,0	9999,00	0,00	0,00	1,00	0,00	99980001
3.500	8	7,0	28000,00	24500,00	56,00	64,00	49,00	12250000
7.000	2	5,0	14000,00	35000,00	10,00	4,00	25,00	49000000
9.999	6	7,0	59994,00	69993,00	42,00	36,00	49,00	99980001
7.000	2	0,0	14000,00	0,00	0,00	4,00	0,00	49000000
8.000	1	0,0	8000,00	0,00	0,00	1,00	0,00	64000000
9.999	4	0,0	39996,00	0,00	0,00	16,00	0,00	99980001
6.000	4	12,0	24000,00	72000,00	48,00	16,00	144,00	36000000
9.999	2	3,0	19998,00	29997,00	6,00	4,00	9,00	99980001
7.000	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49000000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
7.000	6	7,0	42000,00	49000,00	42,00	36,00	49,00	49000000
8.000	3	10,0	24000,00	80000,00	30,00	9,00	100,00	64000000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
8.000	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	64000000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	6	0,0	59994,00	0,00	0,00	36,00	0,00	99980001
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	7	0,0	69993,00	0,00	0,00	49,00	0,00	99980001
9.999	3	0,0	29997,00	0,00	0,00	9,00	0,00	99980001
9.999	0	3,0	0,00	29997,00	0,00	0,00	9,00	99980001
4.500	13	8,0	58500,00	36000,00	104,00	169,00	64,00	20250000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	3	0,0	29997,00	0,00	0,00	9,00	0,00	99980001
9.000	10	1,0	90000,00	9000,00	10,00	100,00	1,00	81000000
4.000	5	0,0	20000,00	0,00	0,00	25,00	0,00	16000000
9.000	4	0,0	36000,00	0,00	0,00	16,00	0,00	81000000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	0	4,0	0,00	39996,00	0,00	0,00	16,00	99980001
7.000	4	0,0	28000,00	0,00	0,00	16,00	0,00	49000000
5.000	12	6,0	60000,00	30000,00	72,00	144,00	36,00	25000000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	2	0,0	19998,00	0,00	0,00	4,00	0,00	99980001
4.500	11	0,0	49500,00	0,00	0,00	121,00	0,00	20250000
4.500	1	0,0	4500,00	0,00	0,00	1,00	0,00	20250000
3.000	14	0,0	42000,00	0,00	0,00	196,00	0,00	90000000
3.500	8	9,0	28000,00	31500,00	72,00	64,00	81,00	12250000
4.000	8	5,0	32000,00	20000,00	40,00	64,00	25,00	16000000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
4.500	5	3,0	22500,00	13500,00	15,00	25,00	9,00	20250000
3.000	3	4,0	9000,00	12000,00	12,00	9,00	16,00	90000000
7.000	3	3,0	21000,00	21000,00	9,00	9,00	9,00	49000000
7.000	3	0,0	21000,00	0,00	0,00	9,00	0,00	49000000
5.000	6	9,0	30000,00	45000,00	54,00	36,00	81,00	25000000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
3.500	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12250000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	4	0,0	39996,00	0,00	0,00	16,00	0,00	99980001
9.999	5	0,0	49995,00	0,00	0,00	25,00	0,00	99980001
6.000	6	0,0	36000,00	0,00	0,00	36,00	0,00	36000000
4.500	10	2,0	45000,00	9000,00	20,00	100,00	4,00	20250000
4.000	4	2,0	16000,00	8000,00	8,00	16,00	4,00	16000000
9.999	2	0,0	19998,00	0,00	0,00	4,00	0,00	99980001
9.999	1	2,0	9999,00	19998,00	2,00	1,00	4,00	99980001
5.000	6	0,0	30000,00	0,00	0,00	36,00	0,00	25000000
9.999	1	0,0	9999,00	0,00	0,00	1,00	0,00	99980001
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
2.500	12	0,0	30000,00	0,00	0,00	144,00	0,00	62500000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
8.000	2	0,0	16000,00	0,00	0,00	4,00	0,00	64000000
4.500	3	12,0	13500,00	54000,00	36,00	9,00	144,00	20250000
9.999	0	1,0	0,00	9999,00	0,00	0,00	1,00	99980001
9.999	2	0,0	19998,00	0,00	0,00	4,00	0,00	99980001

Vis(y)	Q_HZBR(x ₁)	Q_CLR(x ₂)	yX ₁	yX ₂	x ₁ x ₂	x ₁ ²	x ₂ ²	y ²
5.000	7	14,0	35000,00	70000,00	98,00	49,00	196,00	25000000
5.000	9	14,0	45000,00	70000,00	126,00	81,00	196,00	25000000
4.000	1	0,0	4000,00	0,00	0,00	1,00	0,00	16000000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	3	0,0	29997,00	0,00	0,00	9,00	0,00	99980001
9.999	3	0,0	29997,00	0,00	0,00	9,00	0,00	99980001
4.000	13	5,0	52000,00	20000,00	65,00	169,00	25,00	16000000
9.999	6	2,0	59994,00	19998,00	12,00	36,00	4,00	99980001
2.500	2	19,0	5000,00	47500,00	38,00	4,00	361,00	6250000
1.200	8	8,0	9600,00	9600,00	64,00	64,00	64,00	1440000
6.000	4	0,0	24000,00	0,00	0,00	16,00	0,00	36000000
2.000	4	9,0	8000,00	18000,00	36,00	16,00	81,00	4000000
2.000	14	4,0	28000,00	8000,00	56,00	196,00	16,00	4000000
3.500	11	12,0	38500,00	42000,00	132,00	121,00	144,00	12250000
9.999	3	0,0	29997,00	0,00	0,00	9,00	0,00	99980001
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	4	4,0	39996,00	39996,00	16,00	16,00	16,00	99980001
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
7.000	9	0,0	63000,00	0,00	0,00	81,00	0,00	49000000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	2	1,0	19998,00	9999,00	2,00	4,00	1,00	99980001
7.000	9	0,0	63000,00	0,00	0,00	81,00	0,00	49000000
6.000	5	9,0	30000,00	54000,00	45,00	25,00	81,00	36000000
9.000	1	0,0	9000,00	0,00	0,00	1,00	0,00	81000000
9.999	2	2,0	19998,00	19998,00	4,00	4,00	4,00	99980001
6.000	5	0,0	30000,00	0,00	0,00	25,00	0,00	36000000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
9.999	2	0,0	19998,00	0,00	0,00	4,00	0,00	99980001
6.000	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36000000
9.999	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99980001
7.000	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49000000
8.000	1	2,0	8000,00	16000,00	2,00	1,00	4,00	64000000
7.000	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49000000
9.999	4	0,0	39996,00	0,00	0,00	16,00	0,00	99980001
792.149	360	230,0	2124522,00	1194571,00	1384,00	2736,00	2122,00	6832420051

DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Y _m	7.690,77
X _{1m}	3,50
X _{2m}	2,23
S _{y1}	-644.154,12
S _{y2}	-574.305,41
S ₁₁	1.477,75
S ₁₂	580,12
S ₂₂	1.608,41
S _{yy}	740.186.670,41
b ₂	-232,81
b ₁	-344,51
VT	740.186.670,41
VE	355.620.099,79
VR	384.566.570,62
R ²	0,47
a	9.414,74

Análise de Regressão

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Quadrados médios	Teste F (F calculado)
Devido às variáveis X1 e X2	355620099,79	2	177810049,90	46,24
Residual	384566570,62	100	3845665,71	
Total	740186670,41	102		

Equação estimada

$$Y_{\text{prev}} = 9.415 + (-344,51) X_1 + (-232,81) X_2$$

RESUMO DOS RESULTADOS

<i>Estadística de regressão</i>	
R múltiplo	0,693142486
R-Quadrado	0,480446506
R-quadrado ajustado	0,470055436
Erro padrão	1961,036896
Observações	103

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	355620100	177810049,9	46,23648114	6,04663E-15
Resíduo	100	384566571	3845665,706		
Total	102	740186670			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	95% <i>inferiores</i>	95% <i>superiores</i>
Interseção	9414,740702	266,818068	35,28524425	3,02268E-58	8885,3812	9944,1002
Q_HZBR(x1)	-344,509841	55,0602745	-6,256958287	9,81447E-09	-453,74787	-235,27181
Q_CLR(x2)	-232,8076067	52,7764798	-4,411199986	2,59624E-05	-337,51465	-128,10056

Vis(y)	Q_HZBR(x ₁)	DPPO(x ₂)	yx ₁	yx ₂	x ₁ x ₂	x ₁ ²	x ₂ ²	y ²
9.999	1	2,0	9999,00	19998,00	2,00	1,00	4,00	99980001
3.500	8	2,0	28000,00	7000,00	16,00	64,00	4,00	12250000
7.000	2	6,0	14000,00	42000,00	12,00	4,00	36,00	49000000
9.999	6	8,0	59994,00	79992,00	48,00	36,00	64,00	99980001
7.000	2	3,0	14000,00	21000,00	6,00	4,00	9,00	49000000
8.000	1	3,0	8000,00	24000,00	3,00	1,00	9,00	64000000
9.999	4	3,0	39996,00	29997,00	12,00	16,00	9,00	99980001
6.000	4	5,0	24000,00	30000,00	20,00	16,00	25,00	36000000
9.999	2	9,0	19998,00	89991,00	18,00	4,00	81,00	99980001
7.000	0	8,0	0,00	56000,00	0,00	0,00	64,00	49000000
9.999	0	4,0	0,00	39996,00	0,00	0,00	16,00	99980001
9.999	0	4,0	0,00	39996,00	0,00	0,00	16,00	99980001
9.999	0	2,0	0,00	19998,00	0,00	0,00	4,00	99980001
7.000	6	3,0	42000,00	21000,00	18,00	36,00	9,00	49000000
8.000	3	5,0	24000,00	40000,00	15,00	9,00	25,00	64000000
9.999	0	5,0	0,00	49995,00	0,00	0,00	25,00	99980001
8.000	0	2,0	0,00	16000,00	0,00	0,00	4,00	64000000
9.999	0	3,0	0,00	29997,00	0,00	0,00	9,00	99980001
9.999	6	3,0	59994,00	29997,00	18,00	36,00	9,00	99980001
9.999	0	3,0	0,00	29997,00	0,00	0,00	9,00	99980001
9.999	7	3,0	69993,00	29997,00	21,00	49,00	9,00	99980001
9.999	3	2,0	29997,00	19998,00	6,00	9,00	4,00	99980001
9.999	0	4,0	0,00	39996,00	0,00	0,00	16,00	99980001
4.500	13	2,0	58500,00	9000,00	26,00	169,00	4,00	20250000
9.999	0	6,0	0,00	59994,00	0,00	0,00	36,00	99980001
9.999	0	7,0	0,00	69993,00	0,00	0,00	49,00	99980001
9.999	3	2,0	29997,00	19998,00	6,00	9,00	4,00	99980001
9.000	10	4,0	90000,00	36000,00	40,00	100,00	16,00	81000000
4.000	5	3,0	20000,00	12000,00	15,00	25,00	9,00	16000000
9.000	4	3,0	36000,00	27000,00	12,00	16,00	9,00	81000000
9.999	0	5,0	0,00	49995,00	0,00	0,00	25,00	99980001
9.999	0	3,0	0,00	29997,00	0,00	0,00	9,00	99980001
7.000	4	3,0	28000,00	21000,00	12,00	16,00	9,00	49000000
5.000	12	5,0	60000,00	25000,00	60,00	144,00	25,00	25000000
9.999	0	3,0	0,00	29997,00	0,00	0,00	9,00	99980001
9.999	0	3,0	0,00	29997,00	0,00	0,00	9,00	99980001
9.999	0	2,0	0,00	19998,00	0,00	0,00	4,00	99980001
9.999	0	2,0	0,00	19998,00	0,00	0,00	4,00	99980001
9.999	2	5,0	19998,00	49995,00	10,00	4,00	25,00	99980001
4.500	11	2,0	49500,00	9000,00	22,00	121,00	4,00	20250000
4.500	1	3,0	4500,00	13500,00	3,00	1,00	9,00	20250000
3.000	14	3,0	42000,00	9000,00	42,00	196,00	9,00	90000000
3.500	8	3,0	28000,00	10500,00	24,00	64,00	9,00	12250000
4.000	8	1,0	32000,00	4000,00	8,00	64,00	1,00	16000000
9.999	0	3,0	0,00	29997,00	0,00	0,00	9,00	99980001
4.500	5	3,0	22500,00	13500,00	15,00	25,00	9,00	20250000
3.000	3	3,0	9000,00	9000,00	9,00	9,00	9,00	90000000
7.000	3	3,0	21000,00	21000,00	9,00	9,00	9,00	49000000
7.000	3	3,0	21000,00	21000,00	9,00	9,00	9,00	49000000
5.000	6	2,0	30000,00	10000,00	12,00	36,00	4,00	25000000
9.999	0	5,0	0,00	49995,00	0,00	0,00	25,00	99980001
3.500	0	2,0	0,00	7000,00	0,00	0,00	4,00	12250000
9.999	0	6,0	0,00	59994,00	0,00	0,00	36,00	99980001
9.999	4	8,0	39996,00	79992,00	32,00	16,00	64,00	99980001
9.999	5	2,0	49995,00	19998,00	10,00	25,00	4,00	99980001
6.000	6	3,0	36000,00	18000,00	18,00	36,00	9,00	36000000
4.500	10	4,0	45000,00	18000,00	40,00	100,00	16,00	20250000
4.000	4	3,0	16000,00	12000,00	12,00	16,00	9,00	16000000
9.999	2	3,0	19998,00	29997,00	6,00	4,00	9,00	99980001
9.999	1	1,0	9999,00	9999,00	1,00	1,00	1,00	99980001
5.000	6	7,0	30000,00	35000,00	42,00	36,00	49,00	25000000
9.999	1	3,0	9999,00	29997,00	3,00	1,00	9,00	99980001
9.999	0	3,0	0,00	29997,00	0,00	0,00	9,00	99980001
2.500	12	2,0	30000,00	5000,00	24,00	144,00	4,00	6250000
9.999	0	4,0	0,00	39996,00	0,00	0,00	16,00	99980001
8.000	2	3,0	16000,00	24000,00	6,00	4,00	9,00	64000000
4.500	3	3,0	13500,00	13500,00	9,00	9,00	9,00	20250000
9.999	0	5,0	0,00	49995,00	0,00	0,00	25,00	99980001
9.999	2	9,0	19998,00	89991,00	18,00	4,00	81,00	99980001

Vis(y)	Q_HZBR(x ₁)	DPPO(x ₂)	yx ₁	yx ₂	x ₁ x ₂	x ₁ ²	x ₂ ²	y ²
5.000	7	6,0	35000,00	30000,00	42,00	49,00	36,00	25000000
5.000	9	7,0	45000,00	35000,00	63,00	81,00	49,00	25000000
4.000	1	3,0	4000,00	12000,00	3,00	1,00	9,00	16000000
9.999	0	4,0	0,00	39996,00	0,00	0,00	16,00	99980001
9.999	3	3,0	29997,00	29997,00	9,00	9,00	9,00	99980001
9.999	3	3,0	29997,00	29997,00	9,00	9,00	9,00	99980001
4.000	13	5,0	52000,00	20000,00	65,00	169,00	25,00	16000000
9.999	6	3,0	59994,00	29997,00	18,00	36,00	9,00	99980001
2.500	2	9,0	5000,00	22500,00	18,00	4,00	81,00	6250000
1.200	8	7,0	9600,00	8400,00	56,00	64,00	49,00	1440000
6.000	4	3,0	24000,00	18000,00	12,00	16,00	9,00	36000000
2.000	4	2,0	8000,00	4000,00	8,00	16,00	4,00	4000000
2.000	14	6,0	28000,00	12000,00	84,00	196,00	36,00	4000000
3.500	11	7,0	38500,00	24500,00	77,00	121,00	49,00	12250000
9.999	3	4,0	29997,00	39996,00	12,00	9,00	16,00	99980001
9.999	0	5,0	0,00	49995,00	0,00	0,00	25,00	99980001
9.999	4	4,0	39996,00	39996,00	16,00	16,00	16,00	99980001
9.999	0	12,0	0,00	119988,00	0,00	0,00	144,00	99980001
7.000	9	4,0	63000,00	28000,00	36,00	81,00	16,00	49000000
9.999	0	7,0	0,00	69993,00	0,00	0,00	49,00	99980001
9.999	2	5,0	19998,00	49995,00	10,00	4,00	25,00	99980001
7.000	9	3,0	63000,00	21000,00	27,00	81,00	9,00	49000000
6.000	5	4,0	30000,00	24000,00	20,00	25,00	16,00	36000000
9.000	1	2,0	9000,00	18000,00	2,00	1,00	4,00	81000000
9.999	2	6,0	19998,00	59994,00	12,00	4,00	36,00	99980001
6.000	5	2,0	30000,00	12000,00	10,00	25,00	4,00	36000000
9.999	0	14,0	0,00	139986,00	0,00	0,00	196,00	99980001
9.999	2	5,0	19998,00	49995,00	10,00	4,00	25,00	99980001
6.000	0	3,0	0,00	18000,00	0,00	0,00	9,00	36000000
9.999	0	5,0	0,00	49995,00	0,00	0,00	25,00	99980001
7.000	0	2,0	0,00	14000,00	0,00	0,00	4,00	49000000
8.000	1	4,0	8000,00	32000,00	4,00	1,00	16,00	64000000
7.000	0	2,0	0,00	14000,00	0,00	0,00	4,00	49000000
9.999	4	3,0	39996,00	29997,00	12,00	16,00	9,00	99980001
792.149	360	419,0	2124522,00	3287172,00	1405,00	2736,00	2213,00	6832420051

DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Y _m	7.690,77
X _{1m}	3,50
X _{2m}	4,07
S _{y1}	-644.154,12
S _{y2}	64.740,63
S ₁₁	1.477,75
S ₁₂	-59,47
S ₂₂	508,52
S _{yy}	740.186.670,41
b ₂	76,70
b ₁	-432,82
VT	740.186.670,41
VE	283.765.856,76
VR	456.420.813,65
R ²	0,37
a	8.891,52

Análise de Regressão

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Quadrados médios	Teste F (F calculado)
Devido às variáveis X1 e X2	283765856,76	2	141882928,38	31,09
Residual	456420813,65	100	4564208,14	
Total	740186670,41	102		

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Quadrados médios	Teste F (F calculado)
Devido às variáveis X1 e X2	$VE = b_1S_{y1} + b_2S_{y2}$	2	$\frac{b_1S_{y1} + b_2S_{y2}}{2}$	$\frac{b_1S_{y1} + b_2S_{y2}}{2}$
Residual	$VR = VT - VE$	n - 3	$S^2 = \frac{VR}{n - 3}$	$\frac{2}{S^2}$
Total	$VT = S_{yy}$	n - 1		

Equação estimada

$$Y_{\text{prev}} = 8.892 + (-432,82) X_1 + 76,70 X_2$$

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,619169335
R-Quadrado	0,383370666
R-quadrado ajustado	0,371038079
Erro padrão	2136,400743
Observações	103

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	283765857	141882928,4	31,08598998	3,17109E-11
Resíduo	100	456420814	4564208,136		
Total	102	740186670			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	8891,5186	491,702034	18,08314382	2,72963E-33	7915,996	9867,0415
Q_HZBR(x1)	-432,8162714	55,7066238	-7,769565658	7,08901E-12	-543,337	-322,2959
DPPO(x2)	76,69795214	94,9622776	0,807667572	0,421199023	-111,705	265,10043

8.3 Algoritmo para Multiplicação das Matrizes de Valores das Variáveis Independentes

Desenvolvido em linguagem Transact-SQL (T-SQL).

```

if exists (select name from sysobjects where name = 'matriz1')
drop table matriz1
if exists (select name from sysobjects where name = 'matriz2')
drop table matriz2
if exists (select name from sysobjects where name = 'matrizmultipla')
drop table matrizmultipla
declare @ncolunas int,
        @nlinhas int,
        @contador int,
        @create varchar(8000),
        @insert varchar(8000),
        @values varchar(8000),
        @update varchar(8000),
        @contalinha int,
        @contacoluna int,
        @contalinha1 int,
        @contacoluna1 int
--| Determinando a quantidade de colunas da matriz1,
--| que é a quantidade de linhas da tabela Principal
select @ncolunas = count(*) + 1 from FSIXPRINCIPAL
--| Determinando a quantidade de colunas da matriz1 (1 / Q_HZBR / Q_CLR)
set @nlinhas = 3
set @nlinhas = @nlinhas + 1
-- criação da matriz1
begin
    set @contador = 0
    while @contador < @ncolunas
    begin
        set @contador = @contador + 1
        if @contador = 1
            select @create = 'coluna0 int identity(1,1)'
        else
            select @create = @create + ',coluna'+convert(varchar(4),@contador-1)+ ' int'
    end
    exec ('create table matriz1 ('+@create+')')
end
-- criação da matriz2
begin
    set @contador = 0
    while @contador < @nlinhas
    begin
        set @contador = @contador + 1
        if @contador = 1
            select @create = 'coluna0 int identity(1,1)'
        else
            select @create = @create + ',coluna'+convert(varchar(4),@contador-1)+ ' int'
    end
    exec ('create table matriz2 ('+@create+')')
end
-- inclusão dos valores na Matriz2
begin
    insert matriz2 (coluna1, coluna2, coluna3)
    select 1, q_hzbr, q_clr
    from FSIXPRINCIPAL
    order by date_time

```

```

end
-- inclusão dos valores na Matriz1
begin
    -- inclusão da primeira linha da Matriz1 (1,1,1,1,.....,1)
    set @contador = 0
    while @contador < @ncolunas - 1
    begin
        set @contador = @contador + 1
        if @contador = 1
        begin
            select @insert = 'coluna'+convert(varchar(4),@contador)
            select @values = '1'
        end
        else
        begin
            select @insert = @insert + ',coluna'+convert(varchar(4),@contador)
            select @values = @values + ',1'
        end
    end
    EXEC ('insert matriz1 ('+@insert+') values ('+@values+')')
    set @contador = 0
    while @contador < @ncolunas - 1
    begin
        set @contador = @contador + 1
        -- inclusão das demais linhas da Matriz1, primeira coluna
        if @contador = 1
        begin
            set @insert = 'insert matriz1 (coluna'+convert(varchar(7),@contador)+') select
coluna'+convert(varchar(5),@contador+1)+' from matriz2 where coluna0 =
'+convert(varchar(5),@contador)
            exec (@insert)

            set @insert = 'insert matriz1 (coluna'+convert(varchar(7),@contador)+') select
coluna'+convert(varchar(5),@contador+2)+' from matriz2 where coluna0 =
'+convert(varchar(5),@contador)
            exec (@insert)
        end
        -- update das demais colunas da Matriz1
        else
        begin
            set @update = 'update matriz1 set coluna'+convert(varchar(7),@contador)+' =
(select coluna2 from matriz2 where coluna0 = '+convert(varchar(5),@contador)+' where coluna0 = 2'
            exec (@update)

            set @update = 'update matriz1 set coluna'+convert(varchar(7),@contador)+' =
(select coluna3 from matriz2 where coluna0 = '+convert(varchar(5),@contador)+' where coluna0 = 3'
            exec (@update)
        end
    end
end
-- criação da MatrizMultipla
begin
    set @contador = 0
    while @contador < @nlinhas
    begin
        set @contador = @contador + 1
        if @contador = 1
            select @create = 'coluna0 int identity(1,1)'
        else
            select @create = @create + ',coluna'+convert(varchar(4),@contador-1)+ ' int'
        end
    end
    exec ('create table MatrizMultipla ('+@create+')')
end

```

```

-- inclusão de valores nulos na MatrizMultipla
begin
    set @contador = 0
    while @contador < @nlinhas -1
    begin
        set @contador = @contador + 1
        insert MatrizMultipla (coluna1, coluna2, coluna3)
        values (0,0,0)
    end
end
-- inclusão dos valores na MatrizMultipla
begin
set @contalinha1 = 0
while @contalinha1 < @nlinhas - 1
begin
    set @contalinha1 = @contalinha1 + 1
    set @contalinha = 0
    while @contalinha < @nlinhas - 1
    begin
        set @contalinha = @contalinha + 1
        set @contacoluna = 0
        while @contacoluna < @ncolunas - 1
        begin
            set @contacoluna = @contacoluna + 1
            set @update = 'update MatrizMultipla set
coluna'+convert(varchar(10),@contalinha)+' = coluna'+convert(varchar(10),@contalinha)+' + (select
coluna'+convert(varchar(10),@contacoluna)+' from matriz1 where coluna0 =
'+convert(varchar(10),@contalinha1)+' * (select coluna'+convert(varchar(10),@contalinha)+' from matriz2
where coluna0 = '+convert(varchar(10),@contacoluna)+' where coluna0 = ' +
convert(varchar(10),@contalinha1)
            exec (@update)
        end
    end
end
end
select * from matriz1
select * from matriz2
select * from matrizmultipla

```


8.4 Algoritmo para Obtenção da Matriz Inversa e Intervalo de Confiança de $E(Y_n)$

Desenvolvido em linguagem Turbo C.

```

#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
void main()
{
float A[3][3],C[3][3],CL[3][3],DET;
int I,J;
float XH[3],XLINH[3],YCHAPH,COEF[3],AUX[3],LINF,LSUP,T;
char VALOR[10];
float QME,S,SYCHAPH;
clrscr();
printf("Digite a matriz.\n");
for(I=0;I<3;I++)
{
for(J=0;J<3;J++)
{
gets(VALOR);
A[I][J]=atof(VALOR);
}
}
DET=A[0][0]*(A[1][1]*A[2][2]-A[1][2]*A[2][1])
+ (-1)*A[0][1]*(A[1][0]*A[2][2]-A[1][2]*A[2][0])
+ A[0][2]*(A[1][0]*A[2][1]-A[1][1]*A[2][0]);

C[0][0]= ((A[1][1]*A[2][2])-(A[1][2]*A[2][1]))/DET;
C[0][1]= -1*((A[1][0]*A[2][2])-(A[1][2]*A[2][0]))/DET;
C[0][2]= ((A[1][0]*A[2][1])-(A[1][1]*A[2][0]))/DET;
C[1][0]= -1*((A[0][1]*A[2][2])-(A[0][2]*A[2][1]))/DET;
C[1][1]= ((A[0][0]*A[2][2])-(A[0][2]*A[2][0]))/DET;
C[1][2]= -1*((A[0][0]*A[2][1])-(A[0][1]*A[2][0]))/DET;
C[2][0]= ((A[0][1]*A[1][2])-(A[0][2]*A[1][1]))/DET;
C[2][1]= -1*((A[0][0]*A[1][2])-(A[0][2]*A[1][0]))/DET;
C[2][2]= ((A[0][0]*A[1][1])-(A[0][1]*A[1][0]))/DET;

for(I=0;I<3;I++)
{
for(J=0;J<3;J++)
{
CL[J][I]=C[I][J];
}
}
printf("Matriz inversa\n");

for(I=0;I<3;I++)
{
for(J=0;J<3;J++)
{
printf( " %f ",CL[I][J]);

```

```

    }
    printf("\n");

}

printf("Digite as vari veis escolhidas, uma de cada vez.\n");
for(J=0;J<3;J++)
{
    gets(VALOR);
    XH[J]=atof(VALOR);
    XLINH[J]=XH[J];
}
printf("Digite os coeficientes da equa#ao: a,b1 e b2 , um de cada vez.\n");
for(J=0;J<3;J++)
{
    gets(VALOR);
    COEF[J]=atof(VALOR);
}
printf("Digite o quadrado m,dio dos erros residuais,extraido da QAV.\n");
gets(VALOR);
QME=atof(VALOR);
printf("Digite o valor da tabela t com n-p-1 graus liberdade e alfa/2.\n");
gets(VALOR);
T=atof(VALOR);
clrscr();
S=0;
for(J=0;J<3;J++)
{
    S=S+(XLINH[J])*(COEF[J]);
}
YCHAPH=S;
printf("YCHAPH=%4.2f \n",YCHAPH);

S=0;
for(I=0;I<3;I++)
{
    for(J=0;J<3;J++)
    {
        S=S+XLINH[J]*CL[J][I];
    }

    AUX[I]=S;
    S=0;
}
S=0;
for(J=0;J<3;J++)
{
    S=S+AUX[J]*XH[J];
}
S=S*QME;
SYCHAPH=pow(S,0.5);
printf("Estimador do desvio padrao de Ychapeu eh SYCHAPH=%5.5f\n",SYCHAPH);
LINF=YCHAPH-(T*SYCHAPH);
LSUP=YCHAPH+(T*SYCHAPH);
printf("%4.1f <= E(Yh) <= %4.1f \n",LINF,LSUP);
}

```