



INSTITUTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM METEOROLOGIA AERONÁUTICA

FILIPPE **MENEGARDO** DE SOUZA, 2º Ten Esp Met

**AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO ÁBACO DE HARRISON NO DIAGNÓSTICO
DE TURBULÊNCIA NO CRUZAMENTO DA CORDILHEIRA DOS ANDES.**

São José dos Campos
2018

INSTITUTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM METEOROLOGIA AERONÁUTICA

FILIPPE **MENEGARDO** DE SOUZA, 2º Ten Esp Met

**AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO ÁBACO DE HARRISON NO DIAGNÓSTICO
DE TURBULÊNCIA NO CRUZAMENTO DA CORDILHEIRA DOS ANDES.**

Trabalho apresentado ao Curso de Especialização em Meteorologia Aeronáutica do Instituto de Controle do Espaço Aéreo, como requisito parcial para aprovação no referido curso.

Área de concentração: Meteorologia Aeronáutica.

Orientador: José Hélio de Abreu, Maj Esp Met.

RESUMO

O estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar os resultados do Ábaco de Harrison no diagnóstico de turbulência no cruzamento da Cordilheira dos Andes, entre os anos de 2016 e 2017. Foram utilizados como dados das ocorrências do fenômeno as informações obtidas por meio do código SIGMET (*Significant Meteorological Information*) emitidos para a FIR (*Flight Information Region*) SAMF (Mendoza), sendo efetuados cálculos de duração total e estatística descritiva, com distribuição de frequências horárias e mensais. Com o uso dos dados observacionais do código METAR (*Meteorological Aerodromo Report*) dos aeroportos de Santiago (SCEL) e Mendoza (SAME) e o vento do FL180 das radiossondagens de Santo Domingo (SCSN) foi realizada análise horária dos casos identificados no Ábaco de Harrison. Os resultados apontaram que o método é uma importante ferramenta e pode auxiliar o Previsor em sua avaliação das condições meteorológicas e previsão do tempo.

Palavras-chave: Ábaco de Harrison. Turbulência Orográfica. Cordilheira dos Andes. Previsão do Tempo.

ABSTRACT

This study was developed with the objective of evaluating the results of Harrison's Abacus in the identification of the Andes Mountains turbulence between 2016 and 2017. The data on the occurrences of the phenomena were obtained by means of the SIGMET code issued to the SAMF FIR, calculating the total duration and descriptive statistics, with hourly and monthly frequencies. Using the observational data from the METAR code of the airports of Santiago e Mendoza and the wind of the FL180 of the Santo Domingo radiosondes, an hourly analysis of the cases identified in the Harrison's Abacus was performed. The results pointed out that the method is important tool and can assist the Meteorologist in his evaluation of the weather conditions and weather forecast.

Keywords: *Harrison's Abacus. Mountain Waves. Andes Mountains. Weather Forecast.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 DESENVOLVIMENTO	8
2.1 Referencial Teórico	8
2.1.1 Turbulência.....	8
2.1.2 Turbulência orográfica.....	9
2.1.3 O cruzamento da Cordilheira dos Andes.....	10
2.1.4 O Ábaco de Harrison.....	13
2.1.5 Skill Score.....	14
2.2 Dados e Metodologia	15
2.2.1 Área de Estudo.....	15
2.2.2 Técnica de coleta de dados.....	17
2.2.3 Metodologia.....	18
2.2.3.1 <i>Classificação da pesquisa</i>	18
2.2.3.2 <i>Análise dos dados coletados</i>	18
2.3 Apresentação e análise dos resultados	19
2.3.1 Identificação dos parâmetros característicos da turbulência.....	19
2.3.2 Teste do Ábaco de Harrison no diagnóstico da turbulência.....	24
3. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	30
REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

Dada a complexidade dos perfis atmosféricos desde baixo a altos níveis e em suas diferentes escalas espacial e temporal, diversos métodos objetivos de previsão do tempo são estabelecidos, de modo a servirem como importantes ferramentas no auxílio ao previsor para alertá-lo sobre a possibilidade de ocorrência de certos eventos.

Uma variedade de fenômenos meteorológicos surgem ou são modificados pela presença das montanhas. Ondas orográficas, ventos foehn, jatos em baixos níveis, chuvas orográficas, são exemplos.

A turbulência provocada pelas ondas orográficas é uma condição de risco dada a instabilidade que provoca. Danos estruturais às aeronaves e, mais comumente, incidentes com passageiros e tripulantes podem ocorrer, inviabilizando a continuidade do voo.

As ondas de montanha surgem em cima e a sotavento das barreiras topográficas quando fortes ventos, com considerável componente perpendicular, ocorrem em ambiente estável (METED, 2018).

Na América do Sul, a Cordilheira dos Andes atua como uma parede para o escoamento de oeste nas latitudes subtropicais e extratropicais (SILVA, 2004). Trata-se de um conjunto contínuo de montanhas que se estende por mais de 7000km, com largura variando de 200 a 700km e altitude média de 4000m.

Companhias aéreas de todo o mundo possuem procedimentos operacionais específicos para o cruzamento dos Andes, sendo a condição de turbulência vital para o planejamento do voo, influenciando inclusive na escolha da rota a ser utilizada.

Por meio das imagens de satélite pode-se detectar a presença de nuvens lenticulares, rotoras e/ou outros padrões de nebulosidades típicos da presença da turbulência orográfica. Porém, nem sempre haverá umidade suficiente para a formação de nuvens, necessitando, assim, o previsor de outros meios para sua análise.

Por isso, modelos matemáticos e métodos objetivos de previsão do tempo constituem importantes ferramentas operacionais no monitoramento de fenômenos meteorológicos, especificamente da turbulência orográfica, favorecendo a segurança e gerenciamento de voo.

Neste estudo foi investigado o fenômeno no cruzamento dos Andes, com foco na rota Santiago/Mendoza. Esta escolha se justifica em razão de ser a rota preferencial para o cruzamento da cordilheira, pela proximidade com o pico Aconcágua, o mais alto das Américas com seus 6962 metros, e pelo típico registro de turbulência na região.

Uma das limitações da pesquisa foi a dificuldade em encontrar publicações científicas recentes que tratassem sobre o método objetivo de diagnóstico de turbulência para os Andes, o Ábaco de Harrison. Isso, apesar de ser uma das principais ferramentas e amplamente utilizada pelos aeronavegantes de todo o mundo para o planejamento de voo para cruzamento da cordilheira.

Desta forma, emergiu o seguinte problema de pesquisa: em que medida os resultados do Ábaco de Harrison conseguem diagnosticar a presença da turbulência no cruzamento dos Andes?

Considerando o questionamento levantado, foi estabelecido como objetivo geral do trabalho: avaliar os resultados do Ábaco de Harrison no diagnóstico de turbulência, no cruzamento da cordilheira dos Andes, nos anos de 2016 e 2017.

Para alcançar o objetivo geral, foram delimitados os seguintes objetivos específicos (OE):

OE1: identificar os parâmetros característicos associados aos casos de turbulências no cruzamento dos Andes, nos anos de 2016 e 2017;

OE2: testar os resultados do Ábaco de Harrison no diagnóstico da turbulência para os dias identificados por meio do método skill score;

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial Teórico

2.1.1 Turbulência

A turbulência é um problema bem conhecido para a segurança e eficiência da aviação geral e comercial (SHARMAN; PEARSON, 2017). De acordo com Storer, Williams e Gill (2018), ela é um fenômeno de grande risco para a aviação, podendo causar danos às aeronaves e ferimentos em passageiros e tripulantes, tornando-se um fator significativo de perigo.

Embora o número de fatalidades, na aviação comercial, relacionadas à turbulência seja baixo, os encontros com turbulência são responsáveis por cerca de 65% de todos os incidentes causados por fatores meteorológicos (SHARMAN et al., 2005). O NTSB (*National Transportation Safety Board*) registra que, a cada ano, cerca de 58 pessoas nos Estados Unidos (EUA) ferem-se em situações de turbulência por não usarem o cinto de segurança (FAA, 2018).

Por estas razões, pilotos, despachantes e controladores de tráfego aéreo tentam evitar as áreas conhecidas de turbulência sempre que possível. Porém, quando não for viável, um aviso pode ser suficiente para mitigar os efeitos sobre os passageiros e tripulação, garantindo que os cintos de segurança estejam afivelados (SHARMAN; PEARSON, 2017).

Um grande número desses encontros de turbulência pode ser evitado através de melhores produtos de previsão. No entanto, os métodos atuais geralmente não fornecem taxas de detecção aceitavelmente altas e ao mesmo tempo taxas de alarme falso baixas para reduções significativas (SHARMAN et al., 2006).

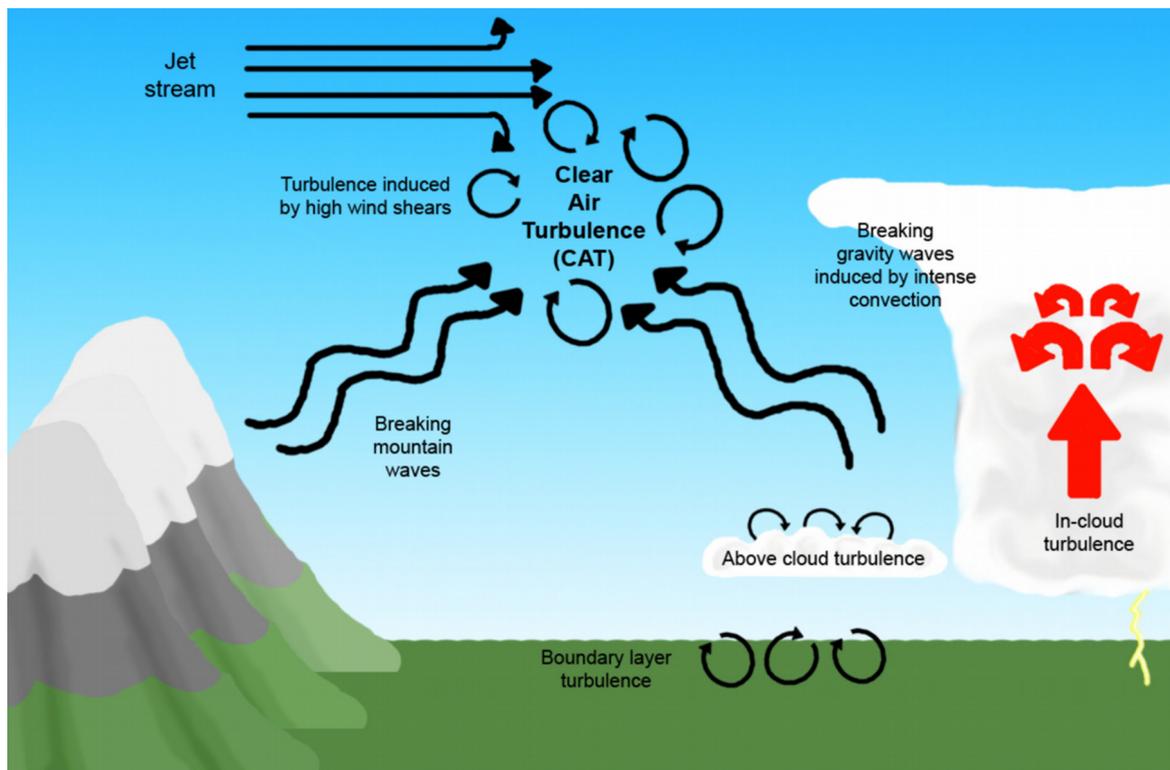
A dificuldade da previsão de turbulência é devida em grande parte ao fato de ser um fenômeno de microescala, com os turbilhões variando num espectro de centenas de quilômetros até centímetros (SHARMAN et al., 2006). Ainda de acordo com os autores, a turbulência é mais pronunciada quando a dimensão dos turbilhões é da ordem do tamanho da aeronave, em torno de 100 metros.

Esta escala não é simulada diretamente nos modelos numéricos devido as atuais resoluções empregadas, e por restrições computacionais. Porém, indicadores de turbulência são utilizados tomando por base o princípio de que a energia associada às escalas menores surgem a partir das maiores, e estas podem ser resolvidas pelos modelos (STORER; WILIAMS; GILL, 2018).

2.1.2 Turbulência orográfica

Diferentes tipos de turbulência que impactam a aviação em suas diferentes fases e níveis de voo podem ser vistos na Figura 1.

Figura 1 – Principais tipos de turbulência que impactam a aviação.

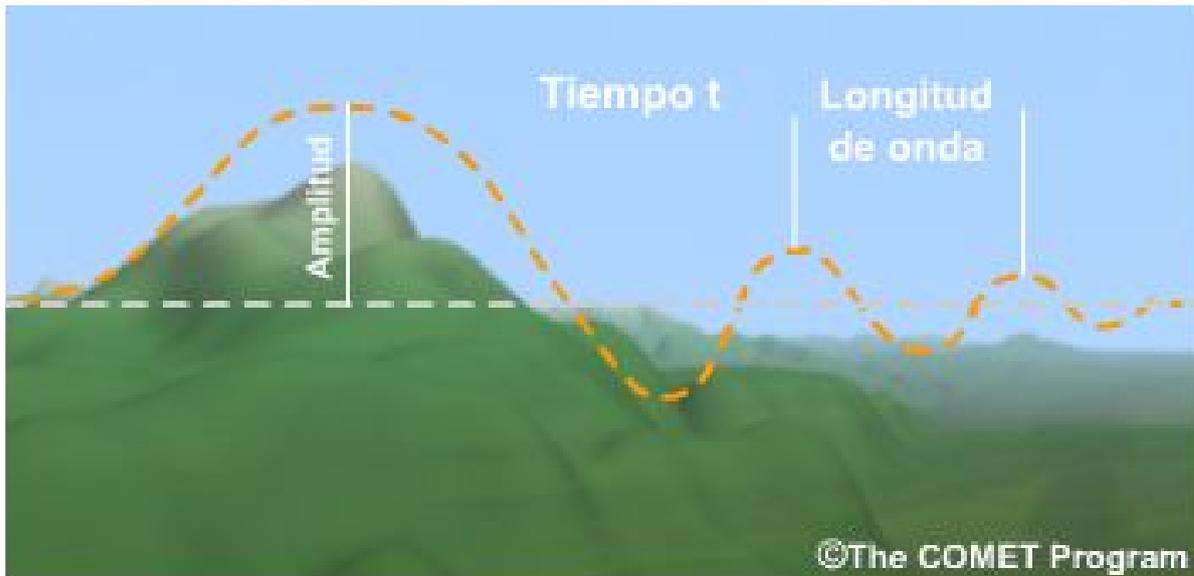


Fonte: Marlton (2016).

Com o início do outono, fortes ventos predominantes de oeste começam a se desenvolver em resposta ao deslocamento sazonal da corrente de jato para latitudes mais baixas (THE FRONT, 2011).

Essa intensificação provoca a advecção de ar sobre as montanhas, que é forçado a subir, mesmo sendo mais denso que o ar ao redor, fazendo-o afundar à sotavento. O ar perturbado afunda e começa a oscilar formando uma onda de gravidade (HOLTON, 2004).

Figura 2 – Representação da formação das ondas orográficas à sotavento de uma região montanhosa.



Fonte: Meted (2018).

Em altas altitudes acima da montanha, o ar também é perturbado formando uma onda gravitacional com um comprimento de onda vertical de vários quilômetros que se propaga a jusante da montanha (MARLTON, 2016). Esta onda pode amplificar e quebrar se atingir um nível crítico, que Holton (2004) se refere como uma altura em que a velocidade do fluxo médio de fundo chega a zero, assim como uma onda quebrando em uma praia, a onda orográfica quebra causando turbulência.

2.1.3 O cruzamento da Cordilheira dos Andes

Para o cruzamento dos Andes, devido aos ventos de oeste, a turbulência ocorrerá a leste da cordilheira (METEOTOTAL, 2018). Ainda de acordo com o autor, um possível indício de ocorrência de turbulência é obtido comparando-se o vento do FL180 no arquipélago de Juan Fernandez (33S080W) e a diferença de pressão entre SCEL e SAME, no Ábaco de Harrison.

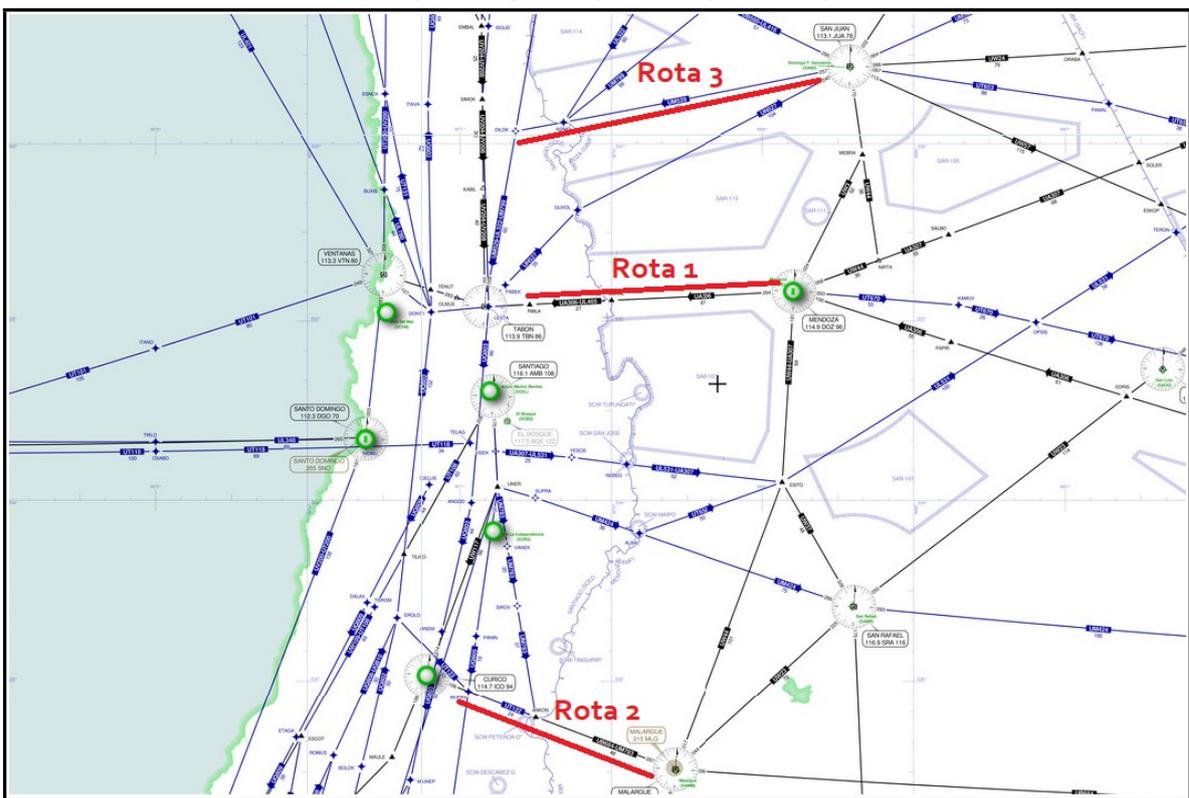
Considerando o evento de turbulência severa enfrentada por uma aeronave da Força Aérea Brasileira (FAB), em 15 de agosto de 2011, ao realizar aproximação para SCEL (Aeroporto de Santiago – Chile), o CENIPA (Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos) através do DIVOP (Divulgação Operacional) nº003/2011, trouxe dentre outras informações e considerações, a recomendação de que as tripulações evitassem o cruzamento dos Andes quando: a diferença de

pressão entre SCEL e SAME for superior a 7hPa e o Ábaco de Harrison indicar turbulência moderada/severa.

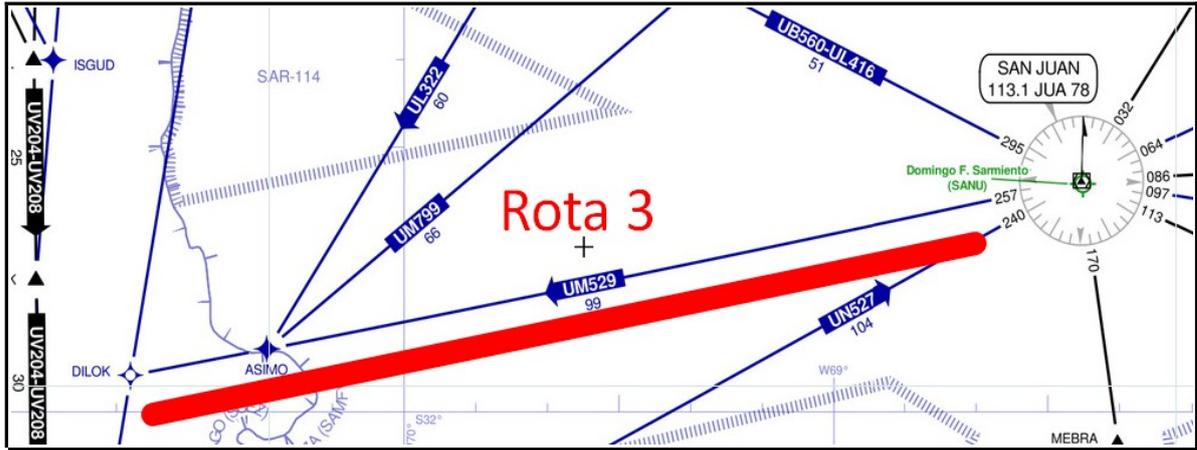
E, de acordo com o Manual de Operações Santiago – SCEL (OPSCEL, 2006), a Cordilheira dos Andes não deverá ser cruzada quando a diferença de pressão entre SCEL e SAME for superior a 7hPa e mais a probabilidade encontrada no Ábaco de Harrison. Estes fatores indicam a existência de turbulência forte.

Segue na Figura 3, imagem da carta de rota do espaço aéreo superior com indicação das rotas para cruzamentos dos Andes.

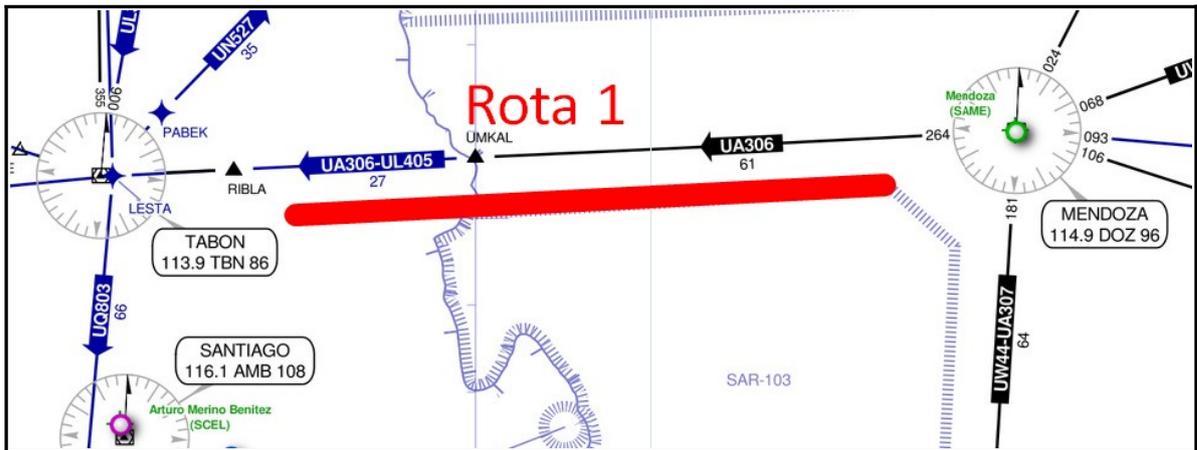
Figura 3 – Carta de rota do espaço aéreo superior. Em vermelho são indicadas as rotas 1, 2 e 3 para cruzamento dos Andes. Em a) mapa geral; b) rota 3; c) rota 1; d) rota 2.



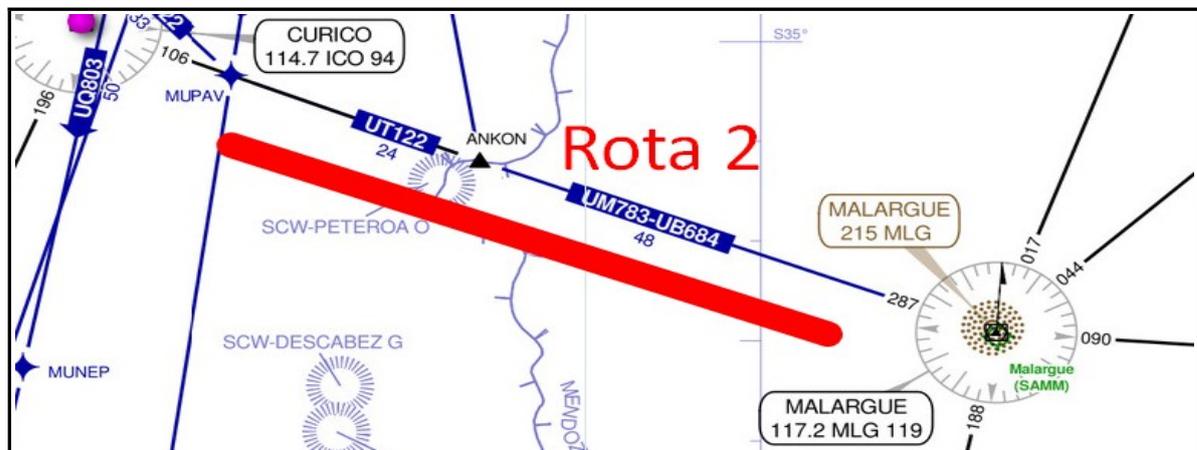
a)



b)



c)



d)

Fonte: Adaptado de OPSCEL (2006) e SkyVector(2018).

A rota 1 é a preferencial para cruzamento dos Andes e deve ser utilizada sempre que as condições meteorológicas permitirem. A entrada pelo fixo UMKAL é a mais utilizada pelas aeronaves procedentes do leste (OPSCEL, 2006).

A rota 2 deve ser utilizada quando as condições de voo forem desfavoráveis e conhecidas tais como: diferença de pressão entre SCEL e SAME superior a 7hPa, consulta ao Ábaco de Harrison e presença de nuvens lenticulares (OPSCEL, 2006).

A aeronave seguirá pela rota 3 quando as condições de voo forem desfavoráveis e conhecidas no setor central e sul da cordilheira (OPSCEL, 2006).

2.1.4 O Ábaco de Harrison

A baixa densidade de dados observacionais na América do Sul torna-se ainda mais grave em regiões montanhosas, onde a heterogeneidade da superfície requer maior representatividade das observações (SILVA, 2002).

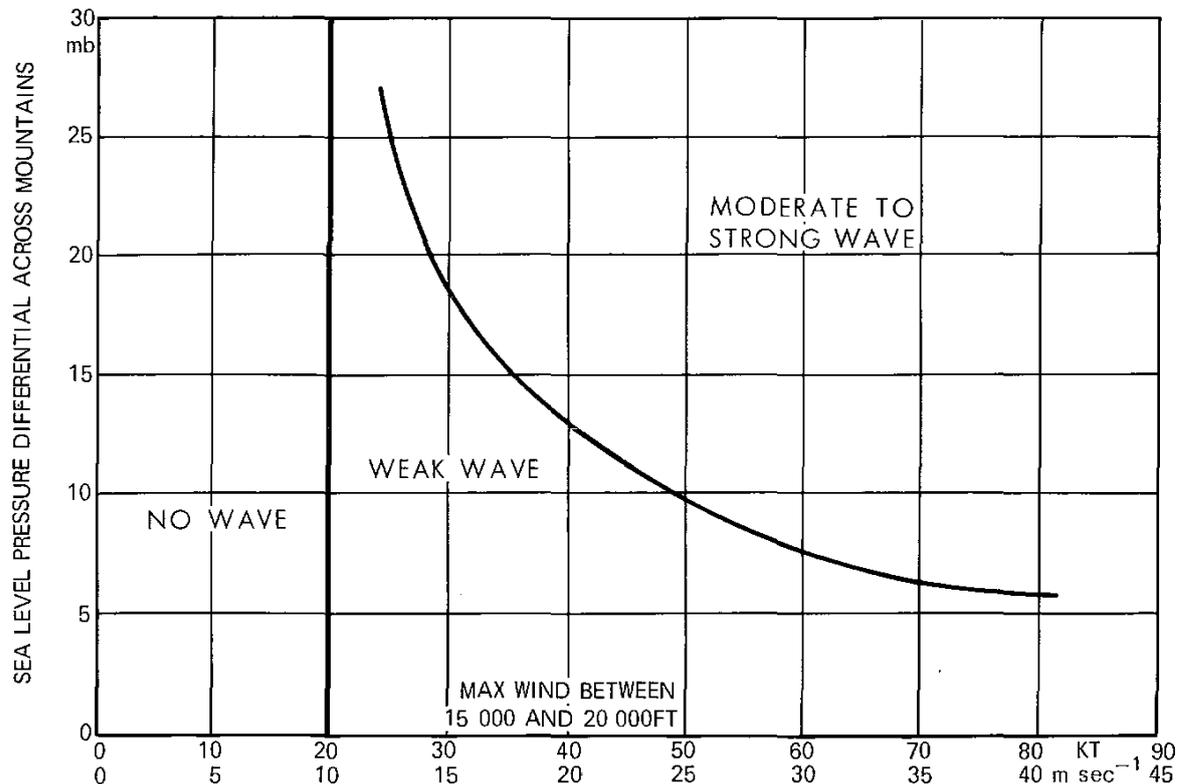
Por isso, em áreas montanhosas os reportes de pilotos sobre a ocorrência de turbulência produzem vitais informações sobre as regiões susceptíveis e sobre as condições meteorológicas favoráveis para sua formação.

Harrison e Sowa (1966 apud WMO n°355, 1973) produziram um guia, a partir dos reportes de pilotos, para 169 áreas no oeste dos EUA sujeitas a turbulência orográfica. Este tipo de informação pode ser usado por companhias aéreas no planejamento diário e sazonal de rotas, a fim de evitar as piores zonas e reduzir o desconforto dos passageiros (WMO N°355, 1973).

Harrison (1957 apud WMO n°355, 1973) desenvolveu um método mais preciso de previsão de intensidade das ondas orográficas sobre as Montanhas Rochosas, nos Estados Unidos, relacionando os reportes de turbulência com a máxima velocidade do vento abaixo de 18000 ft e a diferença de pressão de cada lado da montanha gerando o diagrama da Figura 4.

O Ábaco de Harrison relaciona o Vento Normal (VN) supondo ser positivo, isto é, o vento fluindo com componente normal predominante de oeste para leste e Diferença de Pressão (DP) positiva (a pressão à barlavento da montanha é maior do que a pressão à sotavento).

Figura 4 – Diagrama de intensidade das ondas orográficas sobre as Montanhas Rochosas em função do máximo da componente normal do vento e da diferença de pressão de cada lado da montanha (Ábaco de Harrison).



Fonte: Harrison (1957 apud WMO n°355, 1973).

Pela Figura 4 observa-se que para que haja turbulência, a intensidade do VN deveria ser de pelo menos 20kt e DP maior que zero.

De acordo com WMO n°355 (1973) este diagrama vem sendo utilizado com grande sucesso, sendo inclusive refinado pelo Serviço Meteorológico da Força Aérea dos Estados Unidos e seu uso estendido para outras áreas do país.

Durante o levantamento bibliográfico desta pesquisa, não foi encontrado nenhum estudo científico sobre a aplicação e eficiência do uso do Ábaco de Harrison para a Cordilheira dos Andes.

2.1.5 Skill Score

Este método é baseado na tabela de contingência (Quadro 1), na qual os casos previstos e os não previstos são comparados com os valores observados e não observados de um determinado evento (SAMPAIO, 1999).

Quadro 1 – Tabela de Contingência.

	PREVISTO	NÃO PREVISTO	TOTAL
OCORREU	a	c	a+c
NÃO OCORREU	b	d	b+d
TOTAL	a+b	c+d	a+b+c+d

Fonte: Adaptado de Dias (2008).

De modo a mensurar a eficiência do modelo estudado, alguns índices estatísticos podem ser calculados a partir dos valores da tabela de contingência. Dentre eles tem-se:

a) Taxa de Acerto (TA): este índice calcula a proporção de previsões corretas (a+d) sobre o total de previsões realizadas. É a forma mais direta e intuitiva de medir a acurácia de uma determinada previsão (DIAS, 2008).

$$TA = \frac{a+d}{a+b+c+d}$$

b) Probabilidade de Detecção (POD): é a fração do total de eventos que ocorreu e foi corretamente previsto pelo modelo.

$$POD = \frac{a}{a+c}$$

c) Razão de Alarme Falso (RAF): é a fração de previsões feitas pelo modelo que não se verificaram.

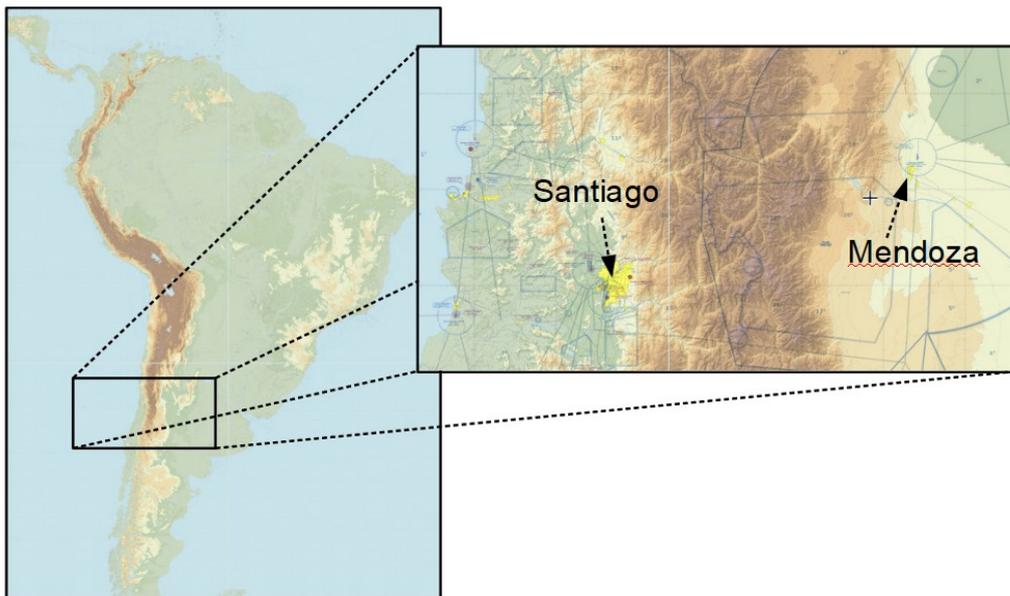
$$RAF = \frac{b}{a+b}$$

2.2 Dados e Metodologia

2.2.1 Área de Estudo

Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de analisar os resultados do Ábaco de Harrison no diagnóstico de turbulência orográfica na região da Cordilheira dos Andes, focalizando o trecho Santiago/Mendoza.

Figura 5 – Área de interesse deste trabalho.



Fonte: Adaptado de SkyVector (2018).

Estabeleceu-se que a FIR SAMF é a região mais representativa das ocorrências da turbulência dos Andes por englobar o aeroporto de Mendoza (SAME), as principais aerovias para cruzamento da cordilheira (Rota 1, Rota 2 e Rota 3) e situar-se totalmente à sotavento dos Andes (Figura 6).

Figura 6 – Área de análise deste trabalho. FIR SAMF.



Fonte: O autor.

2.2.2 Técnica de coleta de dados

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, foram coletados os dados dos códigos SIGMET referentes à turbulência, da FIR SAMF emitidos nos anos de 2016 e 2017. Tais informações foram obtidas do site da REDEMET (Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica).

O SIGMET é um código que fornece uma informação concisa, emitido por um Centro Meteorológico de Vigilância (CMV), referente a ocorrência ou observação de uma específica condição meteorológica em rota e outros fenômenos da atmosfera que possam afetar a segurança das operações aéreas. A sua validade é subjetiva, até mesmo quando confeccionado a partir de um reporte de aeronave. Mas refere-se ao período prognosticado por um Meteorologista da maior probabilidade de ocorrência de um fenômeno, podendo ser renovado para mais horas ou até mesmo cancelado, caso não se espere mais que ocorra.

Os dados de QNH (Pressão reduzida ao nível do mar) dos aeroportos de SCEL (Santiago) e SAME (Mendoza) foram obtidos do código METAR das 00Z às 23Z dos dias identificados com turbulência, por meio do site da REDEMET. Os códigos SPECI (*Special Meteorological Aerodromo Report*) foram descartados nesse estudo pois para o uso do Ábaco de Harrison são necessárias as informações de duas localidades para um mesmo horário.

Foram utilizados os dados de direção e velocidade do vento no FL180 (500mb) das 00Z e 12Z, dos dias identificados com turbulência, das radiossondagens de SCSN (Santo Domingo/Chile) conseguidos no site da Universidade de Wyoming, nos Estados Unidos. Esta localidade foi escolhida por situar-se à barlavento dos Andes, próxima ao litoral do oceano Pacífico, na costa do Chile. O vento assim obtido foi estipulado como válido para toda a região de estudo (FIR SAMF).

Nos dias/horas em que não haviam dados de vento, foram utilizadas as informações das cartas prognosticadas WIND/TEMPERATURES elaboradas pelo WAFC (*World Area Forecast Center*), e disponibilizadas no site da REDEMET. Para o horário das 12Z, foi utilizada a carta com rodada das 06Z do mesmo dia. Para o horário das 00Z, foi utilizada a carta com rodada das 18Z do dia anterior.

Cartas prognosticadas de tempo significativo (SIGWX), do dia identificado com maior duração de turbulência, foram obtidas por meio do site da REDEMET.

2.2.3 Metodologia

2.2.3.1 Classificação da pesquisa

Para alcançar os objetivos geral e específicos, esta pesquisa foi classificada como exploratória (GIL, 2002). Buscou-se por meio do uso de dados de vento no FL180 e gradiente de pressão entre SCEL e SAME, analisar os resultados do Ábaco de Harrison no diagnóstico da turbulência orográfica, entre os anos de 2016 e 2017. A escolha do período foi definida a fim de serem considerados os dados mais recentes e em número suficiente de casos para caracterizar o estudo e identificar os padrões de tempo associados ao fenômeno.

Considerando os procedimentos técnicos que foram adotados, esta pesquisa foi classificada como documental e *ex post facto* (GIL, 2002), pois valeu-se dos registros passados de dados meteorológicos dos aeroportos de SCEL e SAME e das informações de vento em altitude das radiossondagens de SCSN.

2.2.3.2 Análise dos dados coletados

Para o cumprimento do OE1, foram selecionados os códigos SIGMET, de previsão e observação, de turbulência emitidos nos anos de 2016 e 2017 na FIR SAMF. Para fins de cálculo diário, os registros do fenômeno em uma mesma data foram contabilizados uma única vez, independente de sua duração ou intermitência. Também foram considerados os dados de data e hora da validade dos SIGMET para a caracterização da incidência do fenômeno, sendo efetuados cálculos de duração total e estatística descritiva, com distribuição de frequências horárias e mensal. Um gráfico com intensidade do vento normal à Cordilheira dos Andes foi construído.

Para o cumprimento do OE2, foram coletados os dados de QNH dos códigos METAR de SCEL e SAME e o vento do FL180 (500hPa) das radiossondagens das 00Z e 12Z de Santo Domingo (SCSN) dos dias identificados com turbulência. Com essas informações foram construídas tabelas horárias para cada dia identificado com turbulência e posteriormente plotados os valores de vento e diferença de

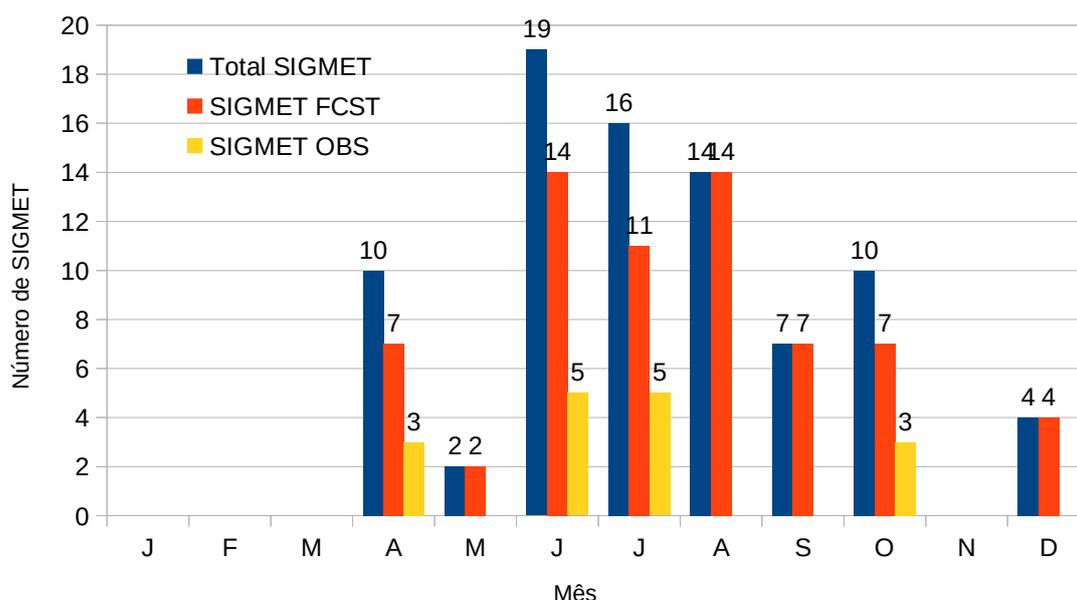
pressão entre SCEL e SAME no gráfico do Ábaco de Harrison. Para o dia com maior duração de turbulência foram selecionadas as cartas prognosticadas SIGWX para confrontar as informações. Por fim, foram determinadas as Tabelas de Contingência para a verificação da precisão do diagnóstico. Elas foram separadas em: dia com maior duração de turbulência, período total de estudo e período total de estudo retificado. Para a construção das Tabelas de Contingência, só foram utilizados os registros de turbulência em horários compatíveis com os dados do METAR. Assim, por exemplo, para o caso de uma turbulência que tenha ocorrido das 1330Z às 1530Z, só seriam utilizados os horários das 14Z e 15Z.

2.3 Apresentação e análise dos resultados

2.3.1 Identificação dos parâmetros característicos da turbulência

Utilizando os dados de SIGMET, previstos e observados, de turbulência na região da FIR SAMF, entre os anos de 2016 e 2017, foram identificados 43 dias de ocorrência do fenômeno, sendo confeccionados 82 códigos SIGMET no período. Em cumprimento ao OE1, foram analisados seus parâmetros característicos.

Gráfico 1 – Total de SIGMET emitidos no período de estudo.



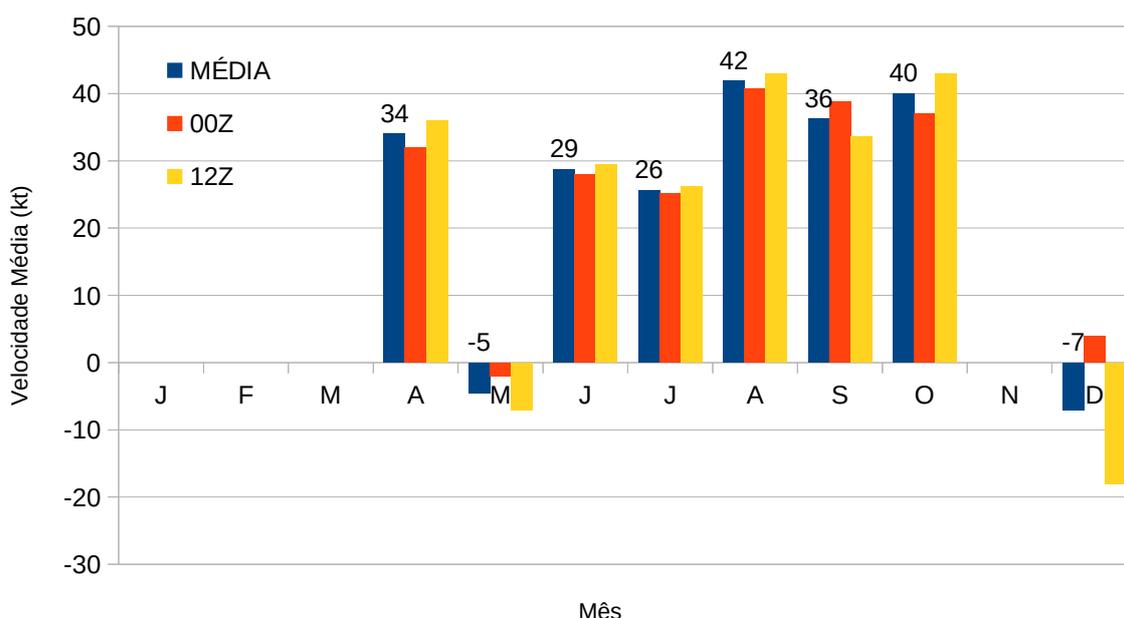
Fonte: O autor.

De acordo com o Gráfico 1, observa-se que no período de estudo, foram emitidos códigos SIGMET de turbulência, prevista e observada, entre os meses de Abril e Outubro e em Dezembro, sendo que os maiores números ocorreram no trimestre

de Inverno (~ 60%). Nos meses de Janeiro, Fevereiro, Março e Novembro não houve registro.

Também pode-se notar um maior número de SIGMET de previsão do que de observação (78% dos códigos SIGMET são de previsão). Isso evidencia a dificuldade na obtenção de informações de ar superior, em específico o registro de turbulência, no cruzamento dos Andes.

Gráfico 2 – Média mensal da velocidade do vento normal à Cordilheira no FL180 em SCSN, das 00Z e 12Z, para os dias identificados com turbulência.

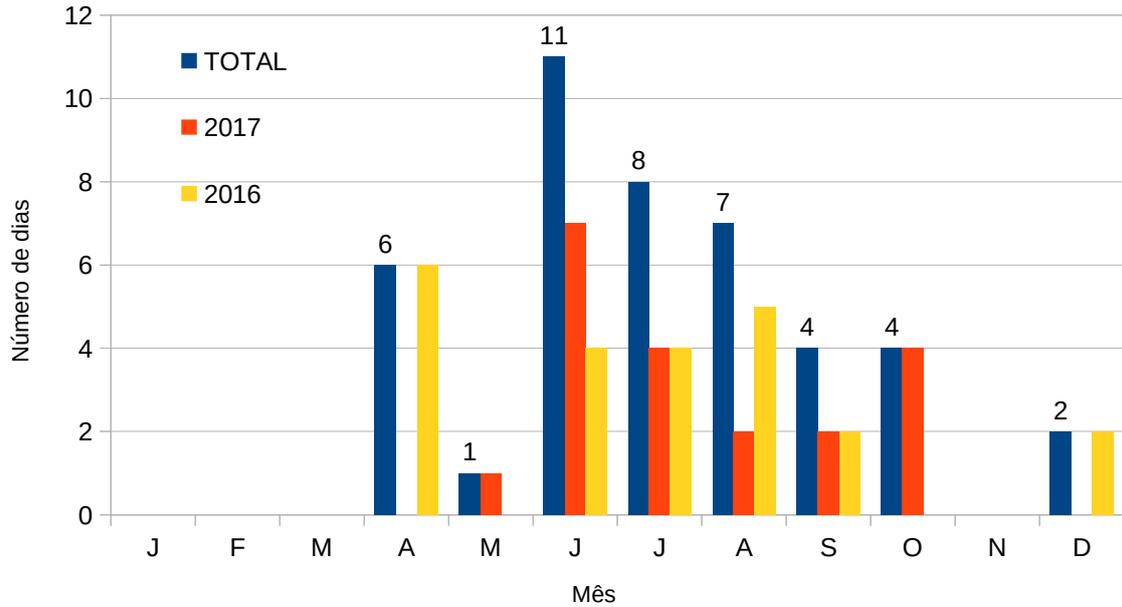


Fonte: O autor

No Gráfico 2, observa-se que a velocidade média do vento perpendicular à Cordilheira, no FL180 em SCSN, para os dias identificados com turbulência, foi de aproximadamente 24kt, sendo que os mais intensos ocorreram nos meses de Agosto e Outubro. Os valores negativos encontrados nos meses de Maio e Dezembro indicam a presença de uma anomalia. Diferentemente do que se esperava, pode ocorrer turbulência nos Andes com vento perpendicular de leste. O valor máximo do vento perpendicular foi de 83kt às 12Z do dia 04 out de 2017.

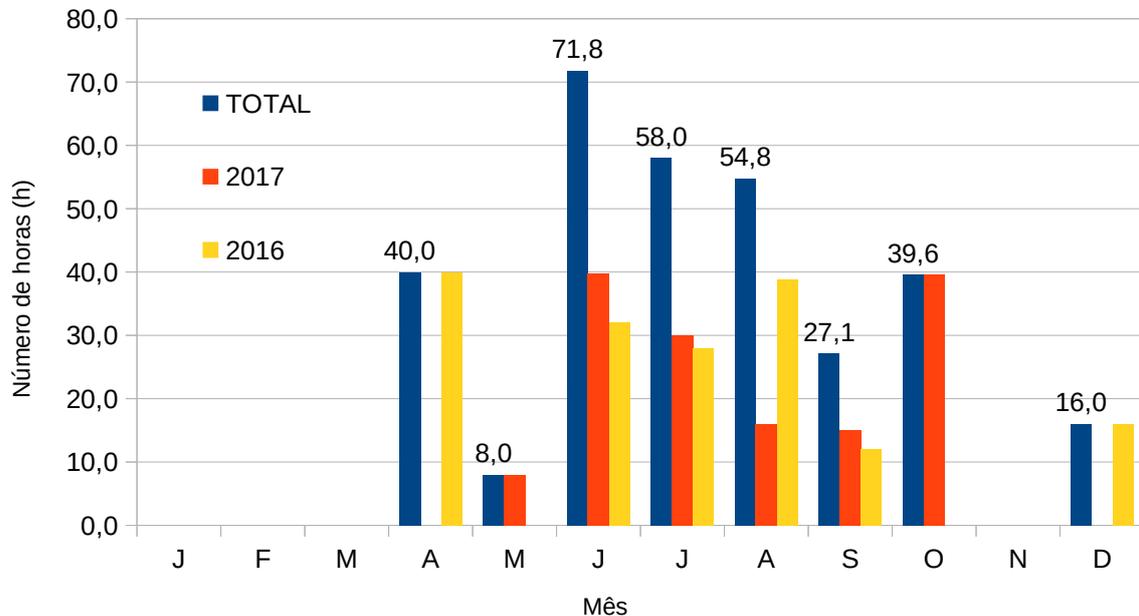
Também verifica-se a alternância de valores máximos entre as 00Z e 12Z, o que indica que o horário do dia pouco influencia a velocidade do vento.

Com relação ao total de dias com turbulência, verifica-se no Gráfico 3 que os meses de inverno possuem mais ocorrências, sendo junho o mês de maior registro.

Gráfico 3 – Total mensal de dias com turbulência.

Fonte: O autor.

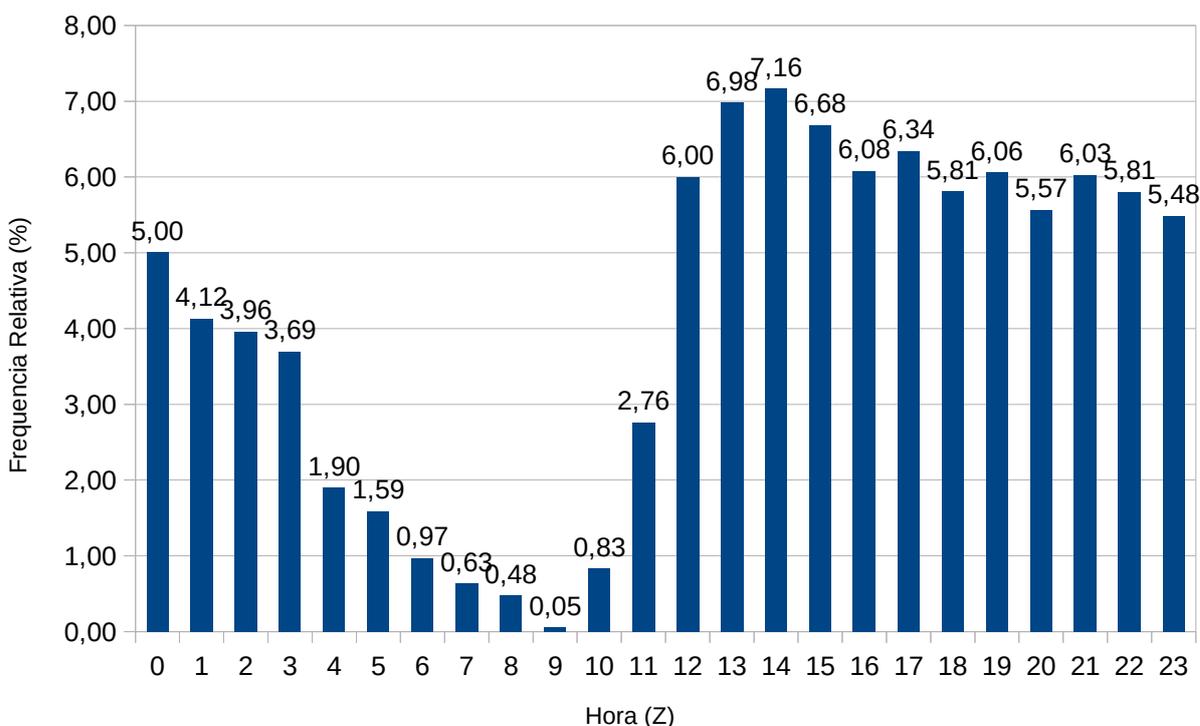
No período de estudo, também foram registradas 315,2 horas totais de turbulência. Como pode ser verificado no Gráfico 4, os meses de inverno possuem os maiores valores, com destaque para junho, que além do possuir o maior número de dias com turbulência, também possui a maior quantidade de horas do fenômeno. Porém o dia com maior duração de turbulência foi 05 de out 2017, com 18 horas.

Gráfico 4 – Total mensal de horas com turbulência.

Fonte: O autor

Analisando a distribuição horária da turbulência (Gráfico 5), observa-se uma tendência de menores registros no período entre 1Z e 11Z. Como o horário do dia pouco influencia na velocidade do vento (Gráfico 2), isso pode ter acontecido por um menor movimento aéreo no fim de noite/madrugada/início da manhã. Tal fato parece afetar a confecção de SIGMET para a região, mesmo para os informes de previsão. No restante do período as frequências relativas mantiveram-se acima de 5%. O horário das 13Z às 15Z é o que tem mais registros de turbulência.

Gráfico 5 – Distribuição horária das ocorrências de turbulência.

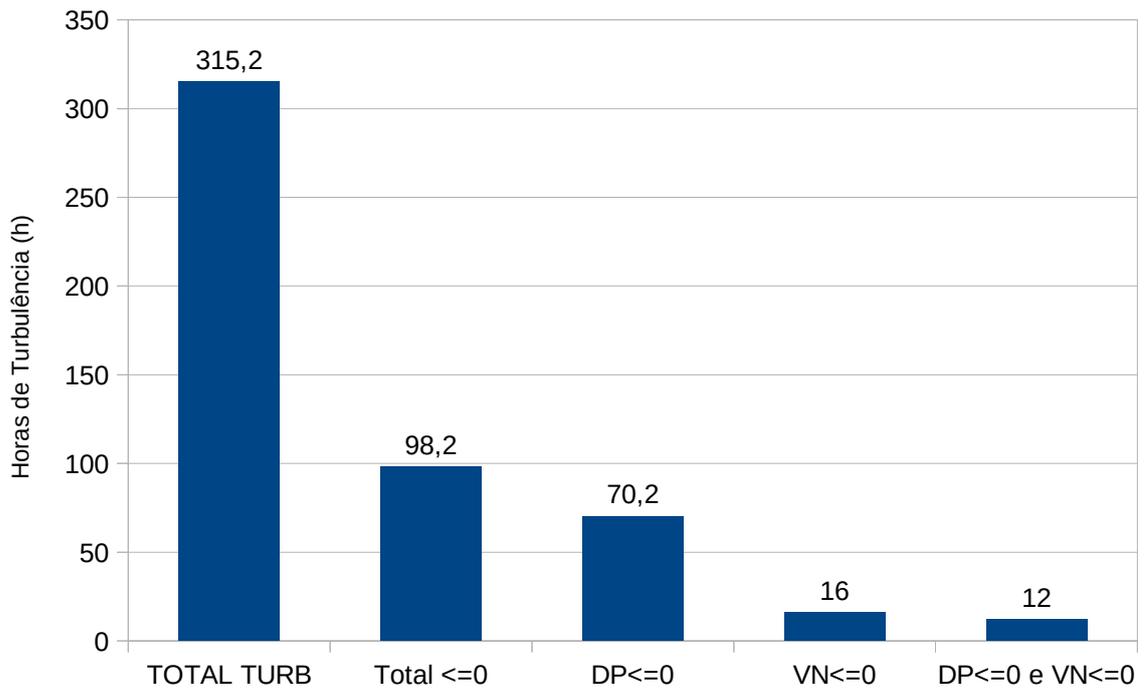


Fonte: O autor.

Do Total de horas de turbulência verificado no período de estudo, cerca de 70,2 horas ocorreram com DP (diferença de pressão entre SCEL e SAME) ≤ 0 , 16 horas foram com VN (vento normal) ≤ 0 e 12 horas com DP ≤ 0 e VN ≤ 0 (Gráfico 6). Dessa forma, aproximadamente 31% dos casos ocorreram com DP ou VN menores ou iguais a zero.

Verifica-se, então, que pode haver turbulência no cruzamento dos Andes mesmo em situações com QNH de SAME maior do que SCEL, assim como com vento normal à cordilheira sendo predominante de leste.

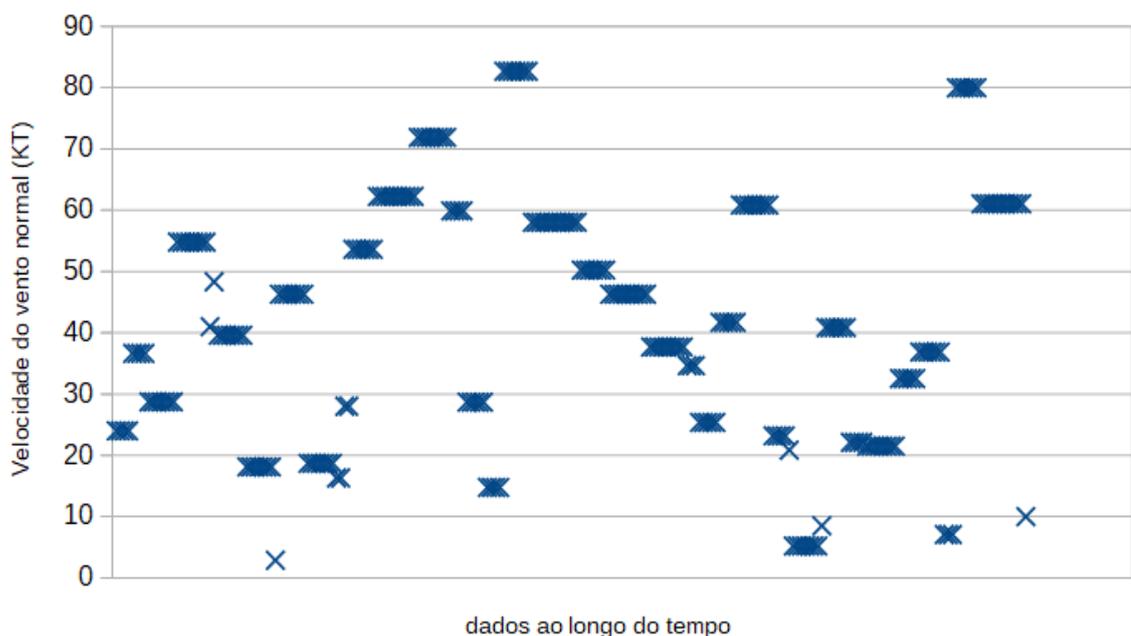
Gráfico 6 – Total de horas de turbulência (TOTAL TURB) em relação ao total de horas com vento normal menor ou igual a zero (VN<=0) e diferença de pressão menor ou igual a zero (DP<=0).



Fonte: O autor.

Considerando que a maior parte dos dados de turbulência ocorreram com DP e VN positivos (69% dos casos), verifica-se pelo Gráfico 7, a distribuição dos registros em função da intensidade do vento normal.

Gráfico 7 – Distribuição dos registros de turbulência no período de estudo em função da intensidade do vento normal à cordilheira dos Andes, considerando DP e VN positivos.



Fonte: O autor.

Ao longo dos anos de 2016 e 2017 foram obtidos 224 registros de turbulência com DP e VN positivos. Todos estes valores são apresentados no Gráfico 7. O eixo x representa uma distribuição temporal destas informações. Quando da ocorrência de mais de um registro de turbulência com a mesma intensidade do vento, os valores foram plotados no gráfico ficando muito próximos.

Do total de dados com DP e VN positivos, cerca de 85% ocorreram com VN maior ou igual a 20 kt.

2.3.2 Teste do Ábaco de Harrison no diagnóstico da turbulência

Com a finalidade de cumprir o OE2, foram construídas planilhas horárias com valores de diferença de pressão entre SCEL e SAME e vento no FL180 em SCSN para cada dia identificado com a turbulência. Para exemplificar, segue no Quadro 2 os dados para o dia 05 out de 2017, o dia com maior duração de turbulência no período de estudo. Os valores obtidos foram posteriormente plotados no gráfico do Ábaco de Harrison para verificação do diagnóstico do fenômeno (Gráfico 8).

Quadro 2 – Planilha horária com diferença de QNH entre SCEL e SAME com vento no FL180. (05 out 2017).

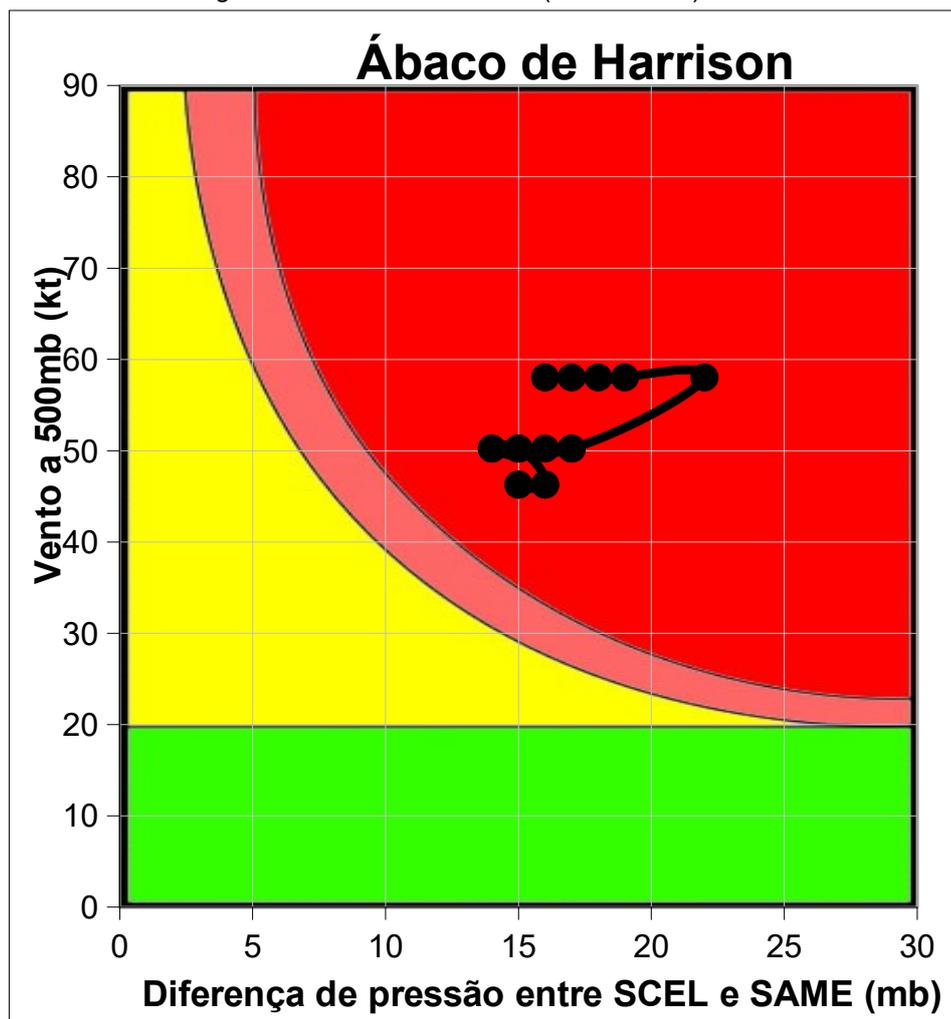
Hora Z	VENTO A 18000 Ft	QNH SCEL	QNH SAME	Vento Perpend.	Diferença QNH	Probab. de Turbulência
0	300067	1014 mb	997 mb	58,0 kts	17 mb	Ver Gráfico
1	300067	1014 mb	998 mb	58,0 kts	16 mb	Ver Gráfico
2	300067	1014 mb	998 mb	58,0 kts	16 mb	Ver Gráfico
3	300067	1015 mb	997 mb	58,0 kts	18 mb	Ver Gráfico
4	300067	1016 mb	997 mb	58,0 kts	19 mb	Ver Gráfico
5	300067	1018 mb	996 mb	58,0 kts	22 mb	Ver Gráfico
6	255052	1019 mb	1002 mb	50,2 kts	17 mb	Ver Gráfico
7	255052	1019 mb	1005 mb	50,2 kts	14 mb	Ver Gráfico
8	255052	1020 mb	1005 mb	50,2 kts	15 mb	Ver Gráfico
9	255052	1021 mb	1004 mb	50,2 kts	17 mb	Ver Gráfico
10	255052	1020 mb	1003 mb	50,2 kts	17 mb	Ver Gráfico
11	255052	1020 mb	1004 mb	50,2 kts	16 mb	Ver Gráfico
12	255052	1021 mb	1006 mb	50,2 kts	15 mb	Ver Gráfico
13	255052	1021 mb	1007 mb	50,2 kts	14 mb	Ver Gráfico
14	255052	1021 mb	1007 mb	50,2 kts	14 mb	Ver Gráfico
15	255052	1021 mb	1007 mb	50,2 kts	14 mb	Ver Gráfico
16	255052	1021 mb	1006 mb	50,2 kts	15 mb	Ver Gráfico
17	255052	1021 mb	1006 mb	50,2 kts	15 mb	Ver Gráfico
18	260047	1021 mb	1005 mb	46,3 kts	16 mb	Ver Gráfico
19	260047	1020 mb	1005 mb	46,3 kts	15 mb	Ver Gráfico
20	260047	1020 mb	1005 mb	46,3 kts	15 mb	Ver Gráfico
21	260047	1020 mb	1005 mb	46,3 kts	15 mb	Ver Gráfico
22	260047	1021 mb	1005 mb	46,3 kts	16 mb	Ver Gráfico
23	260047	1021 mb	1006 mb	46,3 kts	15 mb	Ver Gráfico

Fonte: Adaptado de METEOTOTAL (2018).

De acordo com o Quadro 2, verifica-se que os valores de diferença de pressão permaneceram durante todo o dia acima de 14mb, com pico de 22mb, e o vento normal ficou acima de 46kt, com pico de 58kt.

Nota-se que alguns horários possuem os mesmos valores de diferença de pressão e vento normal, o que provocou a superposição na plotagem do Gráfico 8.

Gráfico 8 – Plotagem do Ábaco de Harrison (05 out 2017).



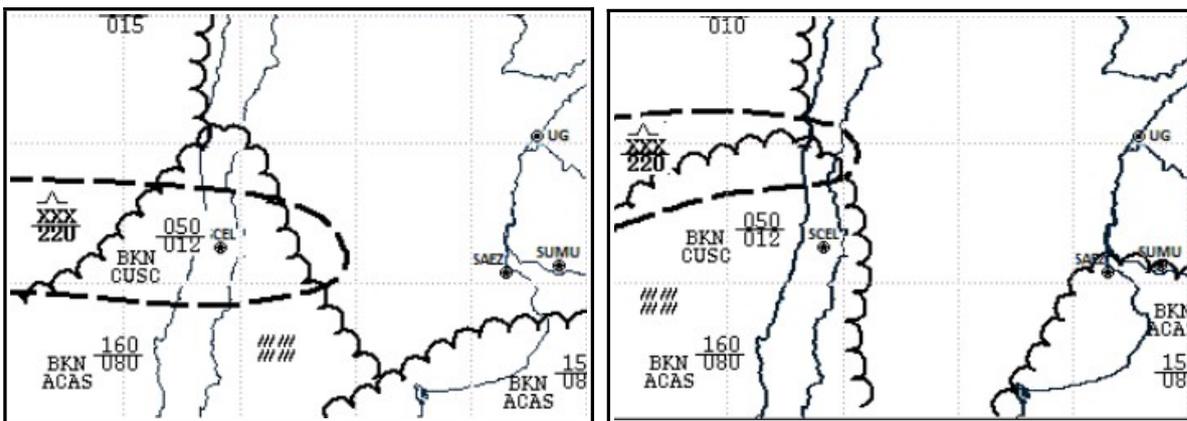
Fonte: Adaptado de METEOTOTAL (2018).

As cores realçadas no Gráfico 8 identificam:

- a) verde: sem turbulência;
- b) amarelo: turbulência leve;
- c) vermelho: turbulência moderada / severa.

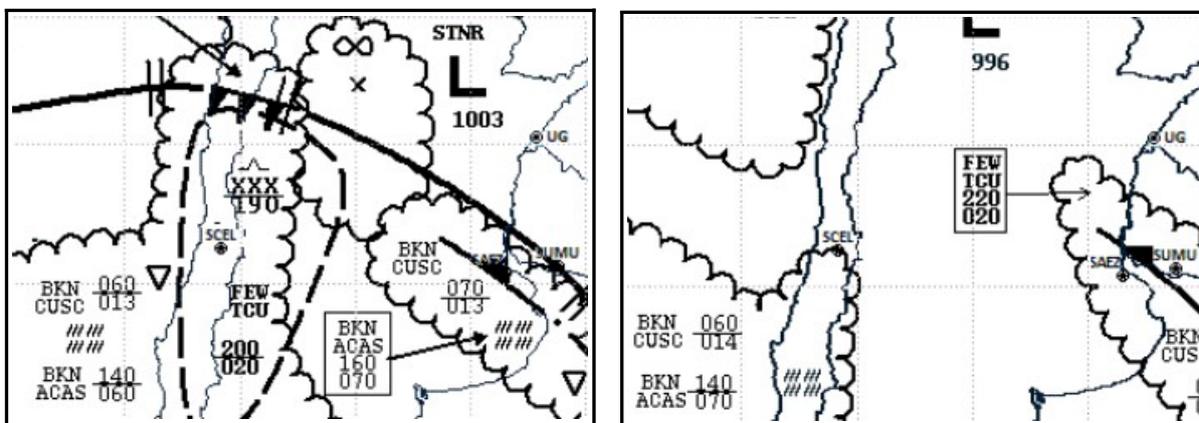
Para este dia, o Ábaco de Harrison diagnosticou a presença de turbulência moderada/severa durante as 24 horas. Porém, tendo por base as validades dos códigos SIGMET, a turbulência nesse dia somente teria ocorrido das 00Z às 06Z e das 12Z às 24Z, totalizando 18 horas. Comparando com a análise das cartas prognosticadas SIGWX verifica-se que a previsão da turbulência nelas foi das 00Z às 15Z (Figura 7). A correspondência de informações, por tanto, ocorreu por um período de somente 9 horas (~50%, das 00Z às 06Z e das 12Z às 15Z).

Figura 7 – Cartas prognosticadas SIGWX SFC/FL250 emitidas pelo CNMA (Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica) de Brasília do dia 05 out 17 a) 00Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 18Z e do dia 06 out 17, e) 00Z.



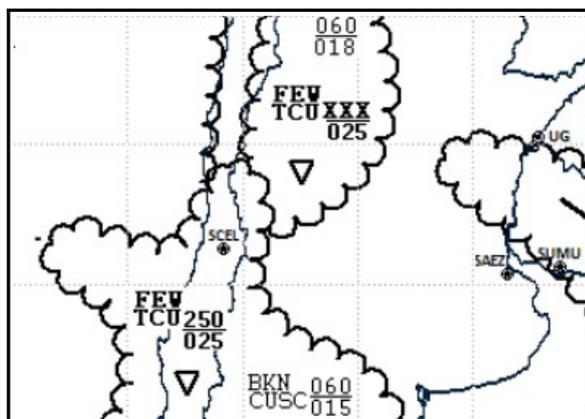
a)

b)



c)

d)



e)

Fonte: REDEMET (2018).

De acordo com o Gráfico 7 e com base nos horários de validade dos SIGMET do dia 05 out 2017, foi construída a tabela de contingência (Quadro 3).

Quadro 3 – Tabela de Contingência para o dia 05 out 2017.

	PREVISTO	NÃO PREVISTO	TOTAL
OCORREU	19	0	19
NÃO OCORREU	5	0	5
TOTAL	24	0	24

Fonte: O autor.

Os seguintes índices foram determinados para o dia 05 out 2017:

Taxa de Acerto (TA): 79,2%;

Probabilidade de Detecção (POD): 100%

Razão de Alarme Falso (RAF): 20,8%

Com estes valores verifica-se que o Ábaco de Harrison conseguiu diagnosticar todo período de turbulência do dia (POD 100%). Porém, como entre os horários das 07Z e 11Z não havia turbulência pelo SIGMET, totalizando 5 registros de Previsto/Não Ocorreu, o Ábaco de Harrison acabou superestimando a ocorrência do fenômeno com uma RAF de 20,8% ocasionando uma TA de 79,2%.

Mas, como visto na Figura 5, entre as 07Z e 11Z havia previsão de turbulência pela carta SIGWX. Levando em conta esta informação, tanto a TA quanto POD seriam de 100% e a RAF de 0%.

Para a análise de todo o período de estudo, foi construída a Tabela de Contingência do Quadro 4.

Quadro 4 – Tabela de Contingência para todo o período de estudo.

	PREVISTO	NÃO PREVISTO	TOTAL
OCORREU	191	136	327
NÃO OCORREU	419	287	706
TOTAL	610	423	1033

Fonte: O autor.

Os seguintes índices foram determinados considerando todo o período de estudo:

Taxa de Acerto (TA): 46,3%

Probabilidade de Detecção (POD): 58,4%

Razão de Alarme Falso (RAF): 68,7%

Verifica-se que o Ábaco de Harrison apresentou desempenho modesto contabilizando todos os registros de turbulência do código SIGMET entre os anos de 2016 e 2017, não conseguindo diagnosticar com eficiência o fenômeno (TA 46,3%) e detectando pouco mais da metade dos registros (POD 58,4%).

Considerando que a construção do Ábaco de Harrison, tem por base apenas valores positivos de diferença de pressão (SCEL/SAME) e de componente do vento normal à cordilheira, uma nova tabela de contingência foi construída seguindo estes parâmetros (Quadro 5).

Quadro 5 – Tabela de Contingência para todo o período de estudo retificada, com somente valores positivos de diferença de pressão e vento normal.

	PREVISTO	NÃO PREVISTO	TOTAL
OCORREU	191	33	224
NÃO OCORREU	419	81	500
TOTAL	610	114	724

Fonte: O autor.

Os novos índices foram assim determinados:

Taxa de Acerto (TA): 37,6%

Probabilidade de Detecção (POD): 85,3%

Razão de Alarme Falso (RAF): 68,7%

Houve uma melhora significativa na POD que avançou de 58,4% para 85,3%, conseguindo, dessa forma, o Ábaco de Harrison diagnosticar a maior parte das ocorrências de turbulência, obedecidos os parâmetros de diferença de pressão e vento normal positivos.

Porém, nessa mesma condição, o número de Não Previsões que Não Ocorreram caiu drasticamente, de 287 para 81. Esse fato fez com que a TA diminuísse para somente 37,6%. Não houve alteração no RAF pois nele já estavam só incluídos os valores de DP e VN positivos.

3. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa trouxe de forma pioneira no Brasil uma avaliação dos resultados do Ábaco de Harrison no diagnóstico da turbulência, no cruzamento da Cordilheira dos Andes. Para tal, estabeleceu-se o período temporal entre os anos de 2016 e 2017, onde os resultados obtidos pelo método foram confrontados com os códigos SIGMET, de previsão e observação, de turbulência emitidos, aplicando-se o método Skill Score por meio da Tabela de Contigência para verificação de sua eficiência.

As informações do período de ocorrência das turbulências obtidas dos códigos SIGMET são subjetivas, até mesmo quando confeccionadas a partir de um reporte de aeronave, que é o caso do SIGMET de observação. A eficiência do Ábaco de Harrison poderia ser melhor avaliada, se os resultados fossem confrontados com informações provenientes de pilotos de aeronaves a respeito de ocorrência de turbulência quando do cruzamento da Cordilheira dos Andes. Contudo, tais informações contidas nos códigos PIREP (*Pilot Report*), AIREP (Aeronotificação) e AMDAR (retransmissão de dados meteorológicos de aeronave) são pouco frequentes sobre a América do Sul. No período de estudo não foi encontrado nenhum destes códigos.

Com isso, a baixa densidade de dados de turbulência para cruzamento da Cordilheira dos Andes acabou por penalizar parte dos resultados apresentados pelo Ábaco de Harrison, vistos, pelo elevado índice de alarme falso (RAF) e pela baixa taxa de acerto (TA). Tal fato ficou evidente quando da análise do dia 05 out 2017. Durante as 24 horas, a DP e VN mantiveram-se elevadas, não se justificando, por tanto, que somente das 07Z às 11Z não houvesse turbulência (de acordo com as validades dos códigos SIGMET do dia), destoando de todo o período.

Assim, muito dos valores de “Previstos que Não ocorreram”, nas Tabelas de Contingência, não seriam falsos alarmes, mas sim prováveis turbulências que não puderam ser comprovadas por falta de registros.

Porém, mesmo com a deficiência, o uso do SIGMET como parâmetro serviu de forma preliminar como um indicativo da eficiência do Ábaco de Harrison. Foi possível identificar que aproximadamente 69% dos casos de turbulência verificados

ocorreram com DP e VN positivos, sendo que destes, em cerca de 85% o vento normal era maior ou igual a 20kt. Estes resultados são compatíveis com a construção do Ábaco de Harrison, evidenciado pelo alto valor da POD de 85,3%.

É possível que os Meteorologistas que confeccionaram os códigos SIGMET, que foram referência para este estudo, tivessem utilizado o Ábaco de Harrison em suas análises, o que poderia gerar um vício nos resultados deste trabalho. Porém isso não ficou evidenciado pois como visto, foram emitidos códigos SIGMET de turbulência mesmo sem indicação do fenômeno pelo Ábaco de Harrison (turbulência com DP e/ou VN negativos), assim como os baixos valores de TA e elevada RAF deixam claro que não houve dependência do SIGMET com a indicação do Ábaco de Harrison.

Apesar dos problemas encontrados neste estudo, tais como ausência de publicações científicas recentes que tratassem sobre o Ábaco de Harrison e a falta de dados observacionais para melhor validação do método, o Ábaco de Harrison pode servir como ferramenta no auxílio ao Previsor na identificação de possíveis turbulências para o cruzamento da Cordilheira dos Andes, não excluindo outros meios, que detém o profissional, para realizar a completa análise das condições atmosféricas.

Por fim, sugere-se um estudo específico para averiguar quais foram os fatores que contribuíram para a ocorrência de turbulência quando a DP e VN forem ≤ 0 (cerca de 31% dos casos) de forma a melhorar a consciência situacional do Previsor em seu diagnóstico e possível prognóstico do fenômeno.

Dada a escassez de dados observacionais verificada para a região, indica-se tentar obter junto às companhias aéreas, dados de turbulência observadas por suas aeronaves de forma a validar com maior efetividade os resultados do Ábaco de Harrison.

E ainda, realizar uma análise qualitativa dos resultados apresentados por indicadores de turbulência, como Ellrod e Brown, calculados a partir das saídas de modelos numéricos de previsão do tempo em comparação com os do Ábaco de Harrison.

REFERÊNCIAS

AHRENS, C. DONALD. **Meteorology Today**: an introduction to weather, climate and environment. 9th. ed. Boston: Brooks/Cole, 2009.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS (CENIPA). Divulgação operacional (DIVOP) n°003, 2011.

DIAS, V. S. **Análise dos índices de instabilidade para previsão de formações convectivas severas para a região do aeródromo do Galeão, Aeroporto Tom Jobim**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Especialização em Meteorologia Aeronáutica), ICEA, São José dos Campos, 2008.

ELLROD, G.P.; KNAPP, D.I. An objective clear-air turbulence forecasting technique: verification and operational use. **Weather and forecasting**, v. 7, p. 150-165, 1992.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Turbulence: Staying safe**. Disponível em: <https://www.faa.gov/travelers/fly_safe/turbulence/>. Acesso em: 07 abr 2018.

FRANÇA, V. D. J. **Avaliação da Simulação da Temperatura de Ar a 2m e Vento em Superfície pelo Modelo WRF (Weather Research and Forecasting) no Aeroporto de Foz do Iguaçu – PR**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Comando e Estado-Maior), ECEMAR, Rio de Janeiro, 2017.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GILL, P. G. Objective verification of World Area Forecast Center clear air turbulence forecasts. **Meteorological Applications**, 21(1), 3–11, 2014.

HOLTON, J.R. **An introduction to dynamic meteorology**. 4th ed. Academic press, 2004.

INSTITUTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (ICEA). **Métodos objetivos de previsão do tempo**. Curso de especialização em meteorologia aeronáutica. São José dos Campos, 2005.

LYRA, A. A.; CHOU, S. C.; DERECZYNSKI, C. P. Indicadores de turbulência a partir de previsões do modelo regional ETA. **Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso)**. v. 22, n.2, p. 161-182, 2007.

MANUAL DE OPERAÇÃO SANTIAGO – SCEL (OPSCEL). **Manual de procedimentos operacionais para voo SCEL**. Revisão n°5, fevereiro de 2006. Disponível em <<http://www.virtualvarig.org/downloads/OPSCEL.pdf>>. Acesso em: 29 mar 2018.

MARLTON, G. J. **On the development, characterisation and applications of a balloon-borne atmospheric turbulence sensor**. Tese (Ph.D). Universidade de Reading, 2016.

MELLO, I.B.F. **Climatologia e Estudo de Caso da Turbulência de Céu Claro a Partir de Registro de Aeronaves: Análise de Dados observacionais e de modelagem**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), INPE, São José dos Campos, 2015.

METED. **Teaching and Training Resources for the Geoscience Community**. Disponível em <<https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mtnwave/>>. Acesso em: 7 abr 2018.

METEOROLOGIA APLICADA A SISTEMAS DE TEMPO REGIONAIS (MASTER). Disponível em: <<http://www.master.iag.usp.br>>. Acesso em: 28 mar 2018.

METEOTOTAL. Tudo en un vistazo. Disponível em <<http://www.jmpalacios.com/meteototal.html>>. Acesso em: 28 mar 2018.

REDE DE METEOROLOGIA DO COMANDO DA AERONÁUTICA (REDEMET). Disponível em <<http://www.redemet.aer.mil.br>>. Acesso em: 26 março 2018.

SAMPAIO, O. B. **Análise da eficiência de quatro índices na previsão de incêndios florestais para a região de Agudos – SP**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

SILVA, A. R. **Ondas Orográficas Sobre a Cordilheira dos Andes em Latitudes Subtropicais: estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), INPE, São José dos Campos, 2004.

SILVEIRA-NETO, A., **Fundamentos da Turbulência nos Fluidos**, em Turbulência, eds. A. P. Silva-Freire, P. P. M. Menut e J. Su, ABCM – Associação Brasileira de Ciências Mecânicas. Br, 2002.

SHARMAN, R.; PEARSON, J. Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence. Part I: Forecasting nonconvective turbulence. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 56(2), 317–337, 2017.

SHARMAN, R.; TEBALDI, C.; WIENER, G.; WOLFF, J. An integrated approach to mid-and upper-level turbulence forecasting. **Weather and Forecasting**, 21(3), 268–287, 2006.

SKYVECTOR. Principal fornecedora de gráficos aeronáuticos mundiais, mapeamento on-line e produtos e serviços de planejamento de voo relacionados. Disponível em <<https://skyvector.com/>>. Acesso em: 07 abr 2018.

STORER, L. N.; WILLIAMS, P. D.; GILL, P. G. Aviation turbulence: dynamics, forecasting, and response to climate change. **Pure and Applied Geophysics**, 2018. Disponível em <<https://doi.org/10.1007/s00024-018-1822-0>>. Acesso em: 05 mai 2018.

THE FRONT. **The Hidden Dangers of Mountain Wave Turbulence**. NOAA's National Weather Service, Novembro de 2011. Disponível em <<https://www.weather.gov/media/publications/front/11nov-front.pdf>>. Acesso em: 26 mar 2018.

UNIVERSIDADE DA FORÇA AÉREA (UNIFA). **Manual de trabalhos acadêmicos da Universidade da Força Aérea**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

UNIVERSIDADE DE WYOMING. Disponível em <<http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>. Acesso em: 28 mar 2018.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. INMET, Ministério da Agricultura e Abastecimento. Recife, PE, 2006.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO): **The airflow over mountains**. WMO, Technical Note, N° 127, WMO N° 355, 1960.