

A OCORRÊNCIA DE INVERSÃO TÉRMICA NO PERFIL TOPOCLIMÁTICO DO PICO DAS AGULHAS NEGRAS – RJ.

Emerson Galvani¹, Nadia Gilma Beserra de Lima²

Resumo: A variação vertical da temperatura do ar, nos limites da troposfera, apresenta uma redução média de $-6,5 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$ (denominado de gradiente adiabático médio), resultado principalmente do aquecimento basal da atmosfera. Em determinadas condições atmosféricas (estabilidade) e configuração do relevo (fundo de vale) podem ocorrer situações em que esse perfil de temperatura ocorra de forma inversa, caracterizando as *inversões térmicas*. Na tentativa de contribuir para o entendimento deste processo monitorou-se a temperatura do ar (Tar) no perfil topoclimático do pico das Agulhas Negras, RJ. A variação altimétrica compreendeu os pontos denominados de P₄ com altitude de 2.440 m, posto P₃ com 2.520 m, o posto P₂ com 2.630 m e o posto P₁ com 2.760 m (pico) de altitude. A temperatura do ar foi monitorada em escala horária com auxílio de sensores eletrônicos entre os dias 06 a 30 de abril de 2005, totalizando 573 leituras horárias em cada posto. Os dados dos pontos foram agrupados em intervalos de classe com amplitude de 2° C. Para o trabalho será considerado ocorrência de *inversão térmica* sempre que o posto de cota inferior apresentar valor de temperatura do ar mais reduzido que aquele da cota superior (inversão). Os resultados mostram que comparando os pontos P₄ e P₁ observa-se que do total de observações, 66% caracterizam inversão térmica. Para os pontos P₄ e P₂ ocorreu inversão térmica em 62% das observações e entre os pontos P₄ e P₃, 18% das observações caracterizam ocorrência do processo. As inversões térmicas mais elevadas ocorreram entre os pontos P₄ e P₁ ($-8,3 \text{ }^\circ\text{C}$), entre os pontos P₄ e P₂ ($-6,5 \text{ }^\circ\text{C}$) e entre os pontos P₄ e P₃ ($-8,3 \text{ }^\circ\text{C}$).

Palavras-Chave: Perfil topoclimático, temperatura do ar, inversão térmica.

Introdução

O gradiente adiabático seco da atmosfera apresenta redução de $-0,98^\circ\text{C.100m}^{-1}$ e o gradiente adiabático saturado expressa redução de $0,4^\circ\text{C.100m}^{-1}$. A variação vertical da temperatura do ar (gradiente) nos limites da troposfera apresenta uma redução em média de $-0,65^\circ\text{C}$ a cada 100 metros de elevação acima do nível da superfície (SELLERS, 1974). Isso ocorre por que a atmosfera é *transparente* a parte

¹ Prof. Dr. Departamento de Geografia – FFLCH – USP. Laboratório de Climatologia e Biogeografia – LCB. E-mail: egalvani@usp.br . Av. Lineu Prestes, 338, CEP 05508-900, Cidade Universitária, São Paulo, SP.

² Aluna de Pós Graduação em Geografia Física, FFLCH, USP. E-mail: nadiagilma@yahoo.com.br.

VII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Rondonópolis, 2006.

da radiação solar de onda curta e mais absorvente para radiação de onda longa terrestre. Assim, a atmosfera passa a ser aquecida a partir da superfície (aquecimento basal). Essa variação obviamente não considera particularidades da rugosidade próxima superfície do solo. Outras particularidades do uso do solo, como cobertura vegetal, coloração, declividade e orientação das vertentes, entre outras, podem influenciar significativamente o perfil vertical de temperatura do ar. Além das características da superfície a dinâmica atmosférica também influencia o gradiente térmico da atmosfera, por exemplo, em condições de estabilidade atmosférica, preferencialmente, em fundos de vale pode ocorrer inversão térmica, ou seja, aumento da temperatura com a elevação acima do nível do solo, contrariando os princípios aqui descritos.

A inversão térmica é uma condição meteorológica que ocorre quando uma camada de ar quente se sobrepõe a uma camada de ar frio, impedindo o movimento ascendente do ar, uma vez que, o ar abaixo dessa camada fica mais frio, portanto, mais pesado, fazendo com os poluentes se mantenham próximos da superfície. A inversão térmica é um processo meteorológico que ocorre durante todo o ano, tanto em ambientes urbanos como rurais. No inverno a altura da camada de inversão costuma ocorrer mais próximo a superfície, principalmente no período noturno. Em um ambiente com um considerado número de indústrias e de circulação de veículos, como o das cidades, a inversão térmica pode resultar em elevada concentração de poluentes, ocasionando problemas de saúde (CETESB, 2006).

Rodela e Tarifa (2000), trabalhando com gradiente térmico na Serra de Ibitipoca, MG, (ambiente não urbano) em um perfil variando de 1.350 a 1.650 metros de altitude, constataram um gradiente ligeiramente diferenciado entre os períodos de verão e de inverno. As temperaturas reduzem cerca de 0,5°C a cada 100 m de elevação de altitude no período frio/seco, e cerca de 0,4°C a cada 100 m de altitude em direção aos pontos mais elevados, no período quente/chuvoso.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos contribuindo para o entendimento e estimativa da relação entre a temperatura do ar e altitude. Alguns modelos consideram ainda dois outros controles: a latitude e a longitude como variável preditiva da temperatura do ar. Os modelos são expressos por meio de regressões múltiplas onde a variável dependente é a temperatura do ar e a variável independente compõe-se pela altitude, latitude e longitude. Obtido os coeficientes de ajustes pode-se estimar a temperatura do ar para outras localidades conhecendo-se somente as coordenadas geográficas do local. Obviamente estes modelos apresentam uma estimativa aproximada da temperatura do ar. Essas aproximações em condições de inversão térmica não expressam fidedignamente o perfil vertical da temperatura do ar. Dentre os trabalhos relacionando temperatura e altitude cita-se: Pinto e Alfonsi (1974) no estado do Paraná, Coelho *et al.* (1973) para o estado de Minas Gerais, Ferreira *et al.* (1971)

no estado do Rio Grande do Sul, Alfonsi *et al.* (1974) no estado de Goiás, Monteiro e Tarifa (1975) ajustaram os coeficientes para o estado da Bahia, dentre outros.

Visando contribuir para o entendimento da ocorrência do processo de inversão térmica e do perfil vertical da temperatura do ar o presente trabalho tem por objetivo: a) Monitorar um perfil topoclimático de temperaturas médias do ar horária no Parque Nacional de Itatiaia, entre as cotas 2440 m e 2760m, perfazendo o perfil da parte superior do Pico das Agulhas Negras; a) Determinar as frequências e os intervalos de ocorrências de inversões térmicas entre os pontos analisados.

Área de estudo

A orografia é um dos principais fatores determinantes do clima na área. As chuvas nas partes mais baixas apresentam média anual de, aproximadamente, 1500mm. Em altitudes mais elevadas, entretanto, a precipitação média anual é da ordem de 2400mm. O regime de temperaturas caracteriza-se por grandes amplitudes térmicas influenciadas também pelas características topográficas da região, sendo a temperatura média anual de 20°C a 22°C. Segundo Garcia (2002), a média máxima de umidade relativa do ar ocorre em dezembro (83%) e a mínima em julho (62%), com média anual de 75,2%. A vegetação local varia de acordo com a altitude. Nas áreas mais baixas a vegetação é secundária e semicaducifólia. Em altitudes intermediárias tem-se a floresta estacional semidecidual e, finalmente, nas áreas acentuadas próximas à 2000 metros de altitude a vegetação é de campos de altitude. A área de estudo quase não apresenta ocupação antrópica, sendo encontradas algumas pastagens para gado leiteiro no entorno da área do parque. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Cwb (clima mesotérmico com verão brando e estação chuvosa no verão), nas áreas acima de 1600 metros de altitude e do tipo Cpb (clima mesotérmico com verão brando sem estação seca), nas partes baixas das encostas da Serra.

A figura 01 apresenta a distribuição dos pontos de medidas ao longo do perfil e a tabela 01 às coordenadas geográficas de cada ponto.

Tabela 01: Coordenadas Geográficas dos pontos de medidas de temperatura do ar.

Ponto	Local	Coordenadas UTM	Altitude
P1	Pico da Agulhas Negras ¹	23k 0534808 x 7525089	2760m
P2	Paredão	23k 0534647 x 7525027	2630m
P3	Ao lado Ponte/ Trilha	23k 0534060 x 7524595	2520m
P4	Entrada do Parque	23k 0530519 x 7525872	2440m

¹ Nomenclatura utilizada para facilitar localização dos pontos.

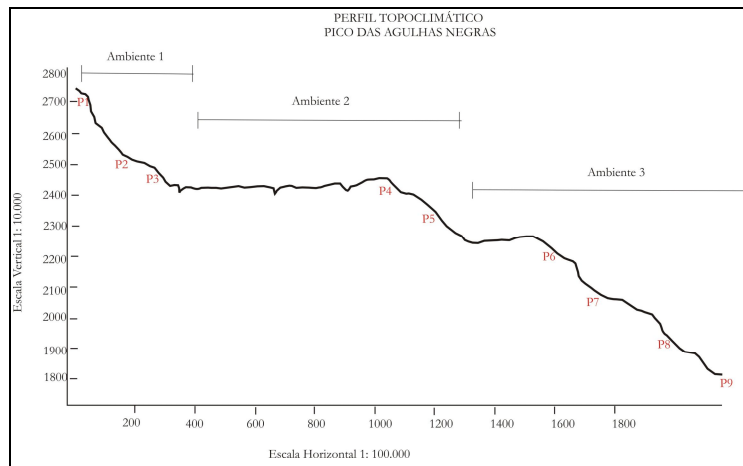


Figura 01: Perfil topográfico (climático) com a localização dos pontos de medidas de temperatura do ar. Pico das Agulhas Negras, Itatiaia, RJ. Fonte: Galvani *et al.* (2006)

Material e Método

Os sensores foram fixados aos abrigos meteorológicos de ventilação passiva de baixo custo construído para a coleta de dados de temperatura e umidade do ar em lugares ermos e desprovidos do fornecimento de energia elétrica. “O abrigo de baixo custo (Abc) de ventilação passiva foi inspirado no modelo 41003 10-Plate Gill Radiation Shield da Campbell, utilizado para proteger o sensor Humicap. O Abc permite uma boa ventilação natural por todos os lados, inclusive por baixo, mas não permite a entrada de chuva e de radiação solar direta em nenhum momento do dia, pois há uma área de superposição entre os ‘anéis’ (inferior e superior), que bloqueia a entrada delas. Evidentemente a radiação solar difusa entra no abrigo e interage com o sensor que está dentro dele, assim como acontece no abrigo meteorológico padrão, cujo fundo é totalmente permeável à radiação solar refletida pelo solo, bem como à radiação de onda longa emitida pela superfície”. (ARMANI; GALVANI, 2005).

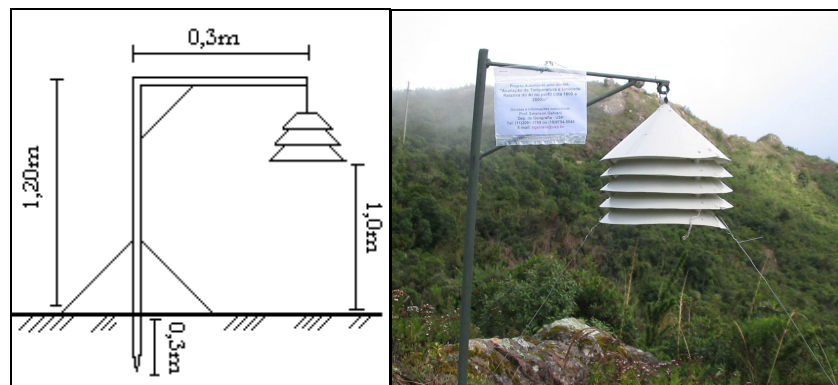


Figura 02: Representação esquemática da instalação dos mini-abrigos meteorológicos (esquerda) e foto do ponto número 05 (direita). Os sensores de temperatura foram fixados no interior do abrigo meteorológico. Pico das Agulhas Negras, Itatiaia, RJ. Fonte: Galvani *et al.* (2006)

VII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Rondonópolis, 2006.

Os sensores foram previamente calibrados antes de sua instalação a campo. As medidas iniciaram-se em 06 de abril de 2005 às 16h00min (momento de instalação do último sensor) e encerram em 18 de maio de 2005 às 12h00min (momento da retirada do último sensor). Contudo para este trabalho será considerado apenas o período entre 06 a 30 de abril em função da falha do sensor de temperatura do P₁ após esta data. Os *microloggers* foram programados para leituras horárias. Os dados foram descarregados em computador e trabalhados em programa Gráfico.

Neste trabalho foram considerados os seguintes critérios para ocorrência de inversão térmica:

1) Sempre que o posto de cota inferior, **no mesmo horário**, apresentar valor de temperatura do ar, mais reduzido que aquele da cota superior será considerado ocorrência de inversão. Assim determinou-se:

- Se temperatura do ar em P_{4(2440m)} for maior que P_{1(2760m)} = inversão térmica;
- Se temperatura do ar em P_{4(2440m)} for maior que P_{2(2630m)} = inversão térmica;
- Se temperatura do ar em P_{4(2440m)} for maior que P_{3(2520m)} = inversão térmica;

2) Sempre que o posto de cota inferior, no mesmo horário, apresentar valor de temperatura do ar, igual ou superior que àquele posto de cota superior será considerado condição normal.

Após a obtenção das ocorrências de inversão efetuaram-se os cálculos das frequências relativas de ocorrência. Os dados foram trabalhados no programa Microcal ORIGIN 6.0. Informações detalhadas sobre estes procedimentos podem ser obtidas em Galvani (2005).

Resultados e Discussão

A figura 03 apresenta a temperatura do ar horário para os dias 15 e 16 de abril de 2005 nos quatro pontos de avaliação. Esse período representa as maiores amplitudes térmicas observados no período da análise. Na data de 16 de abril às 04h00min registrou-se uma inversão térmica de 8,4 °C entre os pontos P₄ e P₁; 6,5 °C entre P₄ e P₂ e; 8,3 °C entre os pontos P₄ e P₃.

Os pontos P₄ e P₃ encontram-se a uma distância, aproximada, de 2500m e com uma variação altimétrica de 80 m. A explicação para esta inversão é o possível acúmulo de ar frio proveniente das partes mais elevadas em um processo denominado de *brisa catabática* e que nestas condições resultam em inversões térmicas. Fisicamente, a superfície resfria-se por perdas radiativas e o ar em contato com esta também se resfria. O ar frio por ser mais denso (fluido) tende a escoar para as partes mais baixas do terreno (brisa catabática). Em noites de estabilidade atmosférica e calmaria este processo tende a ser mais intenso, pois dificulta a mistura do ar. Este processo é contínuo do ocaso do sol até o nascente seguinte. O ar frio se acumula nas partes mais baixas do terreno (observe o perfil topoclimático da

figura 01) resultando em temperaturas em cotas inferiores superiores às das cotas superiores. Pressupõe-se, portanto que para ocorrência de inversão térmica a configuração da bacia hidrográfica em forma de *garganta fechada* é um importante controlador deste processo.

Infere-se que essa inversão de temperatura seja um limitante da aplicação dos modelos de estimativa da temperatura do ar somente em função da altitude do local. Talvez por essa razão esses modelos limitem-se a estimativa das temperaturas normais médias mensais e anuais, onde a observação na escala horária acaba sendo *mascarada* por uma escala temporal maior.

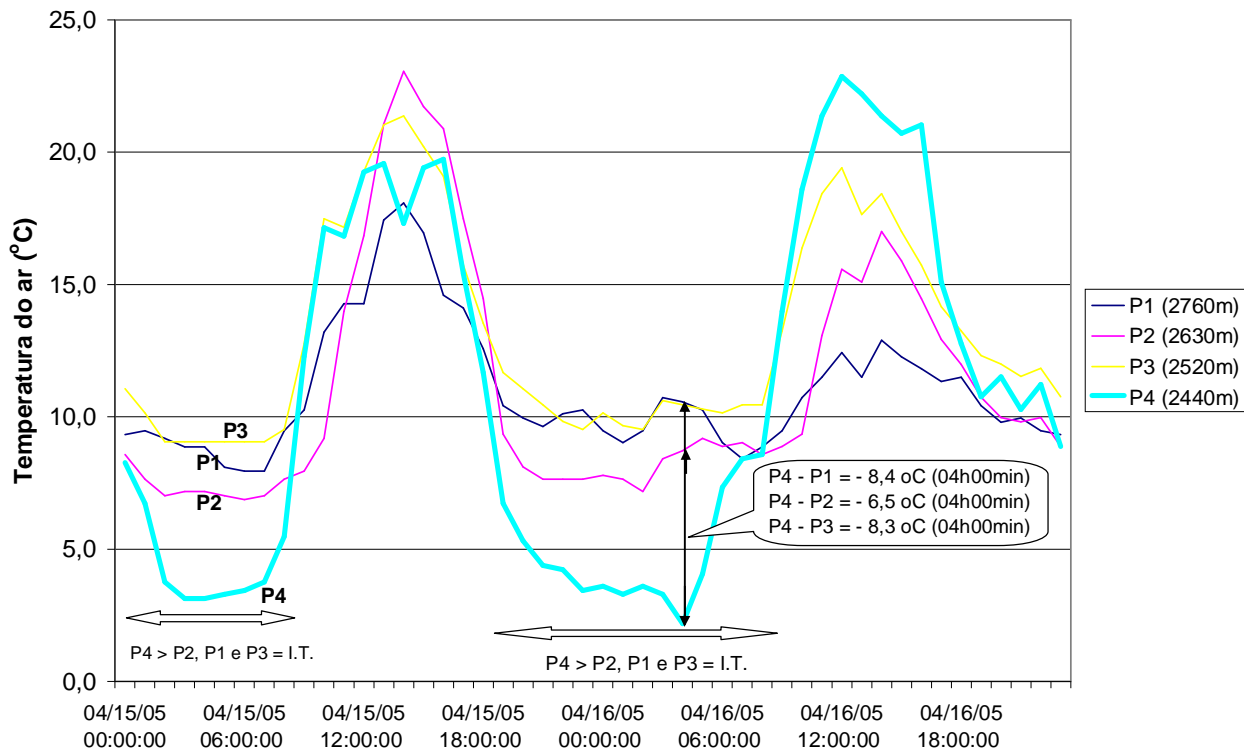


Figura 03: Variação da temperatura do ar nos dias 15 e 16 de abril de 2005 nos quatro pontos de observação. Período com as maiores amplitudes térmicas. Pico das Agulhas Negras, Itatiaia, RJ.

A figura 04 apresenta a derivada da figura 03, ou seja, a variação da amplitude térmica horária nos dois dias representados. **É possível observar que as amplitudes térmicas ocorrem, preferencialmente, no período noturno com poucos eventos no período diurno.** Este fato reitera as afirmações do parágrafo anterior acerca da ocorrência de brisa catabática no perfil no período noturno. É possível descrever a variação diária da amplitude térmica por meio de um polinômio de sexta ordem, onde se observa a fase positiva do polinômio nas horas de brilho solar (condição de variação de temperatura normal) e a fase negativa no período noturno (inversão térmica). Provavelmente a ocorrência de campos de altitude nas proximidades da cota 2400m (onde esta o P₄) seja resultado desta interação clima-vegetação neste perfil.

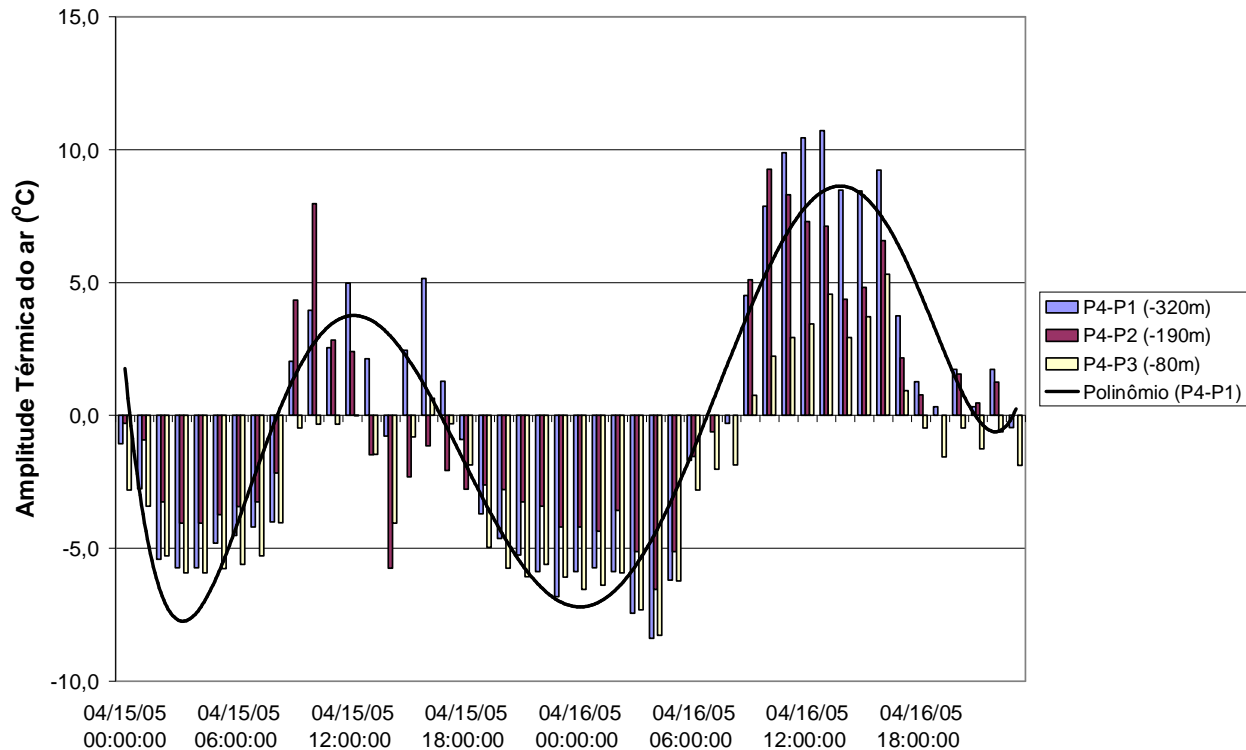


Figura 04: Variação da amplitude térmica ao longo dos dias 15 e 16 de abril de 2005 entre os pontos P₄-P₃, P₄-P₂ e P₄-P₁. Pico das Agulhas Negras, Itatiaia, RJ

O observador mais desavisado pode associar estas inversões térmicas a processos isolados em alguns dias ao longo do ano. Para evidenciar a ocorrência deste processo realizou-se um estudo das frequências absolutas e relativas de ocorrência de inversão térmica durante o período entre 06 a 30 de abril de 2006. A tabela 02 expressa as porcentagens de ocorrência de inversão térmica em relação ao total de observações para todo o período avaliado. Constata-se que entre os pontos P₄ – P₁ em 380 observações (66%) registrou-se inversão térmica e em 193 observações o perfil apresentou-se normal, ou seja, redução de temperatura com aumento da altitude. Analisando os pontos P₄ – P₂ o total é de 354 observações (62%) com ocorrência de inversão térmica e para a diferença entre P₄ e P₃ totaliza 102 observações (18%) com inversão térmica. Essa análise mostra que o processo de inversão térmica representa a maioria das observações efetuadas no período deste trabalho, evidenciando novamente que outros controles locais influenciam a variação vertical da temperatura do ar além da altitude, como a configuração do perfil e as condições atmosféricas atuantes.

VII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Rondonópolis, 2006.

Tabela 02: Porcentagem de ocorrência de inversão térmica entre os pontos de observação para todo o período entre 06 de abril de 18 de maio de 2006. Pico das Agulhas Negras, Itatiaia, RJ.

Pontos	Inversão Térmica	Situação normal	Porcentagem com inversão térmica	Total de observação
$P_4 - P_1$	380	193	66 %	573
$P_4 - P_2$	354	219	62 %	573
$P_4 - P_3$	102	471	18 %	573

A Figura 05 (superior, centro e inferior) apresenta a frequência relativa de ocorrência das diferenças entre as temperaturas observadas entre os pontos P_4-P_3 , P_4-P_2 e P_4-P_1 . Cabe considerar que somente caracteriza-se como inversão térmica os valores a abaixo de zero, ou seja, sempre que a temperatura do ponto P_4 for menor que os demais pontos (P_3 , P_2 e P_1). Esse tipo de análise permite avaliar qual o intervalo de inversão térmica ocorre com maior frequência no perfil. O ponto médio da classe expressa o intervalo de variação da inversão térmica, por exemplo, intervalo de classe -2 da Figura 5 (superior) evidencia que 13,1% das observações encontram-se entre -3 e -1 °C entre os pontos P_4 e P_1 , 7,5% estão então entre -5 e -3 °C, e assim sucessivamente.

A análise numérica da figura 5, evidencia que as maiores frequências relativas de ocorrência de inversão térmica entre os pontos P_4 e P_1 estão entre -1 e +1 °C com 16,9%, entre os pontos P_4 e P_2 também entre -1 e +1 °C com 38,2% e, entre P_4 e P_3 no intervalo entre -3 e -1 °C com 38,9% das ocorrências. Isso implica dizer o mesmo que:

- Entre os pontos P_4 e P_1 do total de 380 ocorrências de inversões térmicas (100%): 0,5% estão entre -9 e -7 °C; 5,1% entre -7 e -5 °C e assim sucessivamente (Figura 05 superior);
- Entre os pontos P_4 e P_2 do total de 354 ocorrências de inversões térmicas (100%): 0,0% estão entre -9 e -7 °C; 1,2% entre -7 e -5 °C e assim sucessivamente (Figura 05 centro);
- Entre os pontos P_4 e P_3 do total de 102 ocorrências de inversões térmicas (100%): 0,9% estão entre -9 e -7 °C; 8,9% entre -7 e -5 °C e assim sucessivamente (Figura 05 inferior);

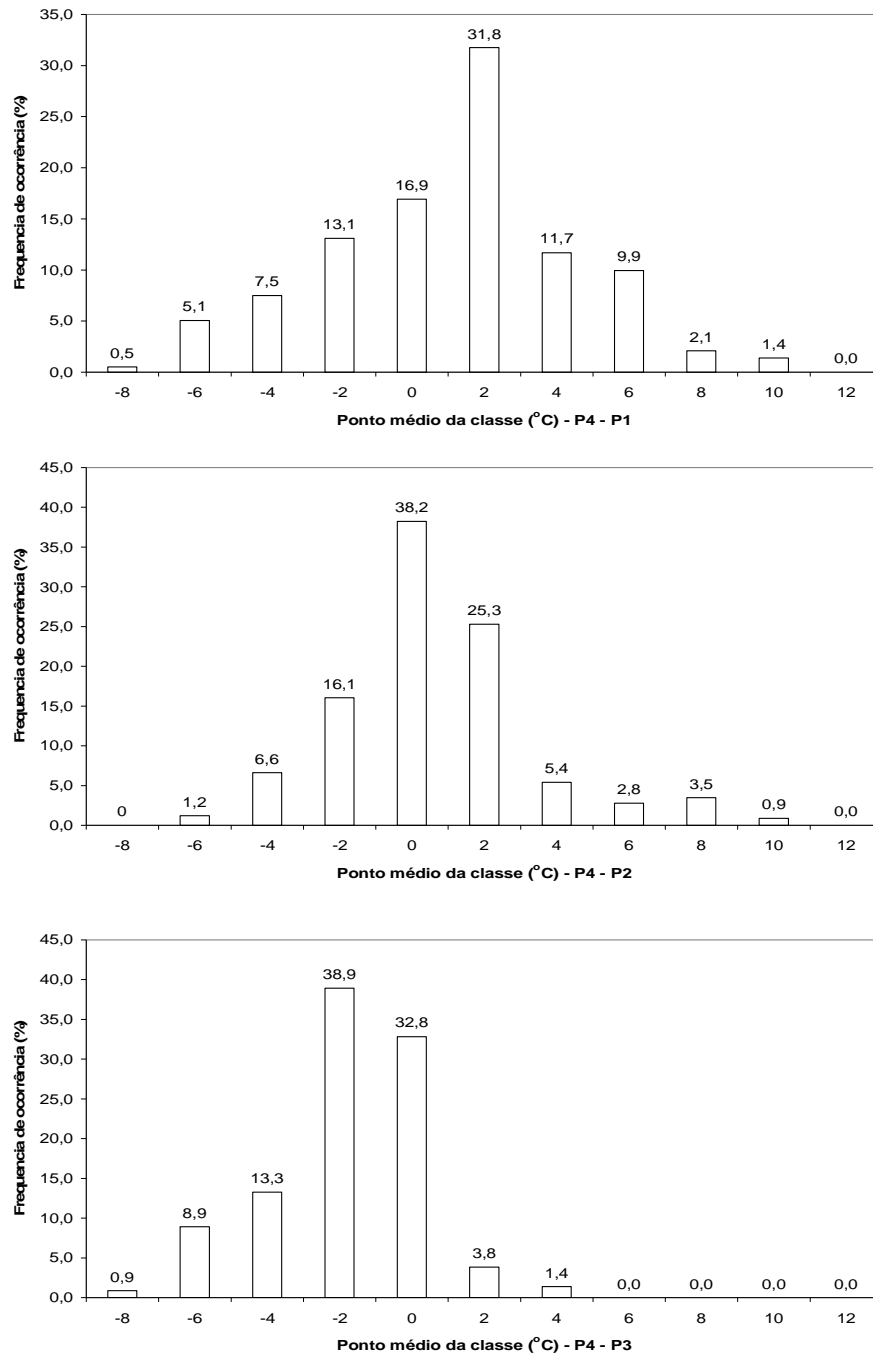


Figura 05: Frequência relativa de ocorrência de inversão térmica entre os pontos P₄-P₁ (superior), P₄-P₂ (centro) e P₄-P₃ (inferior) para o período entre 06 a 30 de abril de 2006. Pico das Agulhas Negras, Itatiaia, RJ.

Considerações Finais

A análise dos resultados no perfil topoclimático do pico das Agulhas Negras, Itatiaia, RJ, permite considerar que:

VII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Rondonópolis, 2006.

- A configuração do perfil topográfico é um significativo controle do clima em relação à ocorrência do processo de inversão térmica;
- A possível ocorrência de brisa catabática no perfil analisado contribui significativamente para a ocorrência do processo de inversão térmica;
- O processo de inversão térmica ocorre com relativa frequência no perfil e estudos voltados para a modelagem da temperatura em função da altitude devem considerar esse processo.

Literatura Citada

- ALFONSI, R.R., PINTO, H.S, PEDRO JR, M.J. Estimativa das normais de temperatura médias mensais e anual para o estado de Goiás em função de altitude e latitude. Caderno de Ciências da Terra, 45, São Paulo, 1974.
- ARMANI, G. Interações entre a atmosfera e a superfície terrestre: variações da temperatura e umidade na bacia B do Núcleo Cunha (IF) - SP. São Paulo, 2004. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ARMANI, Gustavo; GALVANI, Emerson. Avaliação do desempenho de um abrigo meteorológico de baixo custo. Artigo submetido à publicação na Revista Brasileira de Agrometeorologia, fevereiro de 2005 (no prelo).
- COELHO, D.T., SEDIYAMA, G.C., VIEIRA, M. Estimativas das temperaturas médias mensais no estado de Minas Gerais, Revista Ceres, 20(112), p.455-59, 1973.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/anexo/inversao.htm>>. Acesso em 20 de junho de 2006.
- FERREIRA, M., BURIOL, G.A., ESTEFANEL, V., PINTO, H.S. Estimativa das temperaturas médias mensais e anuais no estado do Rio Grande do Sul. Revista do Centro de Ciências Rurais, 1(4), p.21-51, 1971.
- GALVANI, E. Sistematização de dados quantitativos. In: Praticando Geografia: Técnicas de campo e laboratório. Organizador: Luis Antonio Bittar Venturi. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, pp.175-186.
- GALVANI, E.; CATARUCCI, A. F. M.; CONICELLI, B.P.; BARBOSA, C.K.; LEAL, F. M.; VICENTINI J. S.B. Avaliação da temperatura do ar no perfil topoclimático do pico das Agulhas Negras, RJ – cota 1800 a 2760 metros. In: Congresso Brasileiro de Biometeorologia, 4, Ribeirão Preto. **Anais...** Sociedade Brasileira de Biometeorologia, 2005, CD ROM.
- GARCIA, José M. P. Diagnóstico ambiental por geoprocessamento da área do Parque Nacional do Itatiaia e seu entorno no Estado do Rio de Janeiro. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - Instituto de Florestas. Curso de pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais. Seropédica, 2002.
- PINTO, H.S., ALFONSI, R. R. Estimativa das temperaturas médias, máximas e mínimas mensais no estado do Paraná, em função da altitude e latitude. Caderno de Ciências da Terra, 52, São Paulo, 1974.
- RODELA, Luciana Graci, TARIFA, José Roberto. O clima da serra de Ibitipoca, Sudeste de Minas Gerais. GEOUSP, Espaço e Tempo, São Paulo, 11, pp.101-113, 2002
- SELLERS, W.D. Physical Climatology. Chigago: The University of Chicago Press, 1974. 272p.

VII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Rondonópolis, 2006.