

**OCORRÊNCIA DE INVERSÃO TÉRMICA NO PERFIL
TOPOCLIMÁTICO DO PICO DA BANDEIRA, PARQUE NACIONAL
DO ALTO CAPARAÓ, BRASIL.**

Emerson Galvani, Nádia Gilma Beserra de Lima, Rita Monteiro Falcão
Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo - USP
Email: egalvani@usp.br, nadia.lima@usp.br, rita.falcao@usp.br

INTRODUÇÃO

O gradiente adiabático seco da troposfera (primeira camada da atmosfera) apresenta redução de $-0,98^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{m}^{-1}$ e o gradiente adiabático saturado expressa redução de $0,4^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{m}^{-1}$. 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 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 que 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 próxima 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. Galvani e Lima (2006) avaliando perfil topoclimático do pico da Agulhas Negras (Itatiaia, SP) observaram que do total de observações (entre os dias 06 a 30 de abril de 2005, totalizando 573 leituras horárias em cada posto), 66% caracterizam situação de inversão térmica. As inversões térmicas mais elevadas ocorreram entre os pontos P4 (2440 m) e P1 (2760 m) com -8,3 °C entre os pontos, entre os pontos

P4 e P2 (2.630 m) e $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, e entre os pontos P4 e P3 (2.520 m) e $-8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ de inversão térmica (IT).

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 as médias da temperatura do ar horárias em um perfil topoclimático do Parque Nacional do Alto Caparaó, MG, entre as cotas 2372 m e 2892 m, perfazendo o perfil da parte superior do Pico da Bandeira; b) Determinar as freqüências e os intervalos de ocorrências de inversões térmicas entre os pontos analisados.

ÁREA DE ESTUDO

O Parque Nacional do Caparaó situa-se na parte sudoeste do estado do Espírito Santo na divisa com o leste do estado de Minas Gerais, abrangendo também parte deste Estado. Localiza-se entre os paralelos 20°19' e 20°37' S e os meridianos 41°43' e 41°53' W com uma área de aproximadamente 26.000 hectares em 1981 (atualmente 31.800 ha). Nesta área a altitude é um controle climático importante que influencia as temperaturas, juntamente com a cobertura vegetal, a proximidade do mar (cerca de 120 km do oceano atlântico) e a latitude. O clima da região é tropical de altitude, em que há presença de uma estação mais chuvosa, correspondente aos meses de primavera e verão, e outra menos chuvosa, correspondente aos meses de outono e inverno. Os totais pluviométricos situam-se entre 1.000 e 1.500 mm anuais, chegando a 1.750 em determinadas áreas do parque. A vertente a barlavento sul não apresenta estação seca, ao passo que a vertente a sotavento pode chegar a três meses de estiagem ao ano, em geral de junho a agosto. A temperatura média anual varia de 24 °C nas áreas de menor altitude a 16 °C nas de altitudes mais elevadas, podendo atingir valores abaixo de zero em determinadas condições atmosféricas (Plano de Manejo, 1981).

MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

Foram instalados oito mini abrigos meteorológicos em uma variação altimétrica partindo do ponto 1 (P1) a 1099 m de altitude até o pico da Bandeira com 2892 m (P8). Detalhes construtivos dos mini abrigos e sua funcionalidade podem ser obtidos em Armani (2005). Os sensores de temperatura e umidade relativa do ar foram programados

para leituras horárias entre os dias 19/04/09 a 22/05/09 totalizando 840 observações (Figura 1). As coordenadas geográficas dos pontos encontram-se na tabela 1. Neste trabalho foram analisados somente os valores de temperatura do ar registrada nos pontos P4, P5 e P8. A escolha destes pontos deve-se a sua localização em relação ao escoamento do ar frio. O ponto P8 é o ponto mais elevado do perfil e os pontos P4 e P5 localizam-se em locais de fundo de vale e aplainados funcionando como locais de acumulo de ar frio.



Figura 1: Mini abrigo meteorológico instalado no ponto 5 ao longo do perfil topoclimático do Pico da Bandeira, MG.

Tabela 1: Localização dos todos os pontos instalados ao longo do perfil topoclimático do Pico da Bandeira, MG (em negrito os pontos utilizados neste trabalho).

Pontos	Coordenadas UTM (X)	Coordenadas UTM (Y)	Altitude (m)
P1	201731	7738801	1099
P2	202201	7739288	1106
P3	206962	7740622	1954
P4	206663	7739426	2365
P5	207374	7739509	2483
P6	207671	7738536	2652
P7	207968	7738022	2801
P8	208286	7737335	2882

Os sensores passaram por um período inicial de calibração antes de serem instalados a campo. Nesta fase todos os sensores ficaram no mesmo ambiente e foram aferidos. Os dados foram descarregados em computador e trabalhados em programa gráfico e estatístico.

Considerou-se ocorrência de inversão térmica sempre que, na leitura da mesma hora, os dados do ponto com cota inferior apresentam registros inferiores aquele de cota mais elevada. Portanto, se o valor de temperatura do ar obtida em P5, por exemplo, for menor que aquele obtido em P8 caracteriza-se como IT. O gradiente altimétrico entre P5 e P8 é de 400 metros e entre P4 e P8 é de 518 metros. Foram estabelecidos quatro intervalos de classes para ocorrência de inversão térmica, conforme tabela 2.

Os dados de ocorrência de IT foram submetidos a análise de frequência relativa de ocorrência (FR) em cada intervalo de classe. A FR

de determinado intervalo de classe representa a porcentagem desse evento em relação ao total de observações.

Tabela 02: Classes de ocorrência de inversão térmica utilizados neste trabalho.

Classe	Intervalo
1	Ausência de IT
2	$> 0,26 < 4,0$ °C
3	$> 4,1 < 8,0$ °C
4	$> 8,1$ °C

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios de temperatura do ar para os pontos P4, P5 e P8 foram de 9,7 °C, 8,9 °C e 8,3°C, respectivamente. Esses valores médios expressam uma redução esperada da temperatura do ar em função a altitude. Contudo, uma análise dos valores de temperatura mínima absoluta indica para P4 um valor de -0,4°C, para P5 um valor de -3,3 °C e para P8 2,9 °C indicando que em P5 ocorreram as menores temperaturas do ar mesmo estando este ponto em cota 400 m abaixo de P8.

A observação visual da figura 2 indica momentos (período noturno em especial) em que a temperatura do ar dos pontos de cota inferior é mais reduzida que aquelas no ponto de cota superior

indicando ocorrência de IT. A tabela 3 apresenta o total de ocorrências de IT entre os pontos P4 e P8 e P5 e P8.

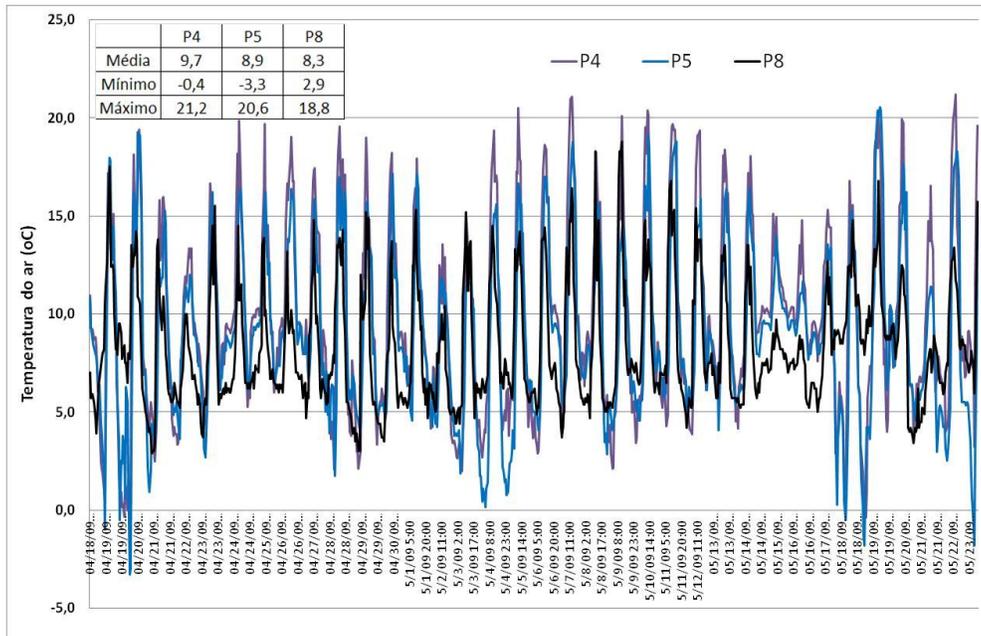


Figura 2: Variação da temperatura do ar nos pontos P4, P5 e P8 entre os dias 19/04/09 a 22/05/09.

Tabela 3: Total de ocorrências de IT nas diferentes classes entre os pontos P4 e P8 e P5 e P8 entre os dias 19/04/09 a 22/05/09.

Classe		IT entre P4 e P8		IT entre P5 e P8	
		Registro	FR (%)	Registro	FR (%)
1	sem IT	608,0	72,9	568,0	68,1
2	> 0,26 < 4,0 °C	174	20,9	172	20,6
3	> 4,1 < 8,0 °C	41	4,9	79	9,5

4	> 8,1 °C	11	1,3	15	1,8
Total		840	100,0	840	100,0

A análise da tabela 3 indica que: entre P4 e P8 ocorreram, respectivamente, 20,9, 4,9 e 1,3% de situações com IT nas classes 2, 3 e 4 e em 72,9% das observações não se registrou ocorrência de IT no perfil topoclimático estudado, entre P5 e P8 do total de observações, 20,6%, 9,5% e 1,8% estiveram dentro dos intervalos de IT nas classes 2, 3 e 4, respectivamente. Em 68,1% das observações as condições de gradiente térmico da atmosfera estiveram dentro do esperado, ou seja, sem IT (classe 1). A inversão térmica mais elevada no período foi registrada entre P5 e P8 com -12,7 °C às 07h00min do dia 20/04/2009 (figura 3). Para este dia e horário, P8 registrou-se 9,7 °C temperatura do ar e em P5 o valor foi de -3,0 °C, evidenciando um acúmulo de ar frio em P5. Esta condição expressa uma estabilidade atmosférica muito acentuada com ar frio escoando para as partes menos elevadas e se acumulando nas proximidades do ponto P5 e P4.

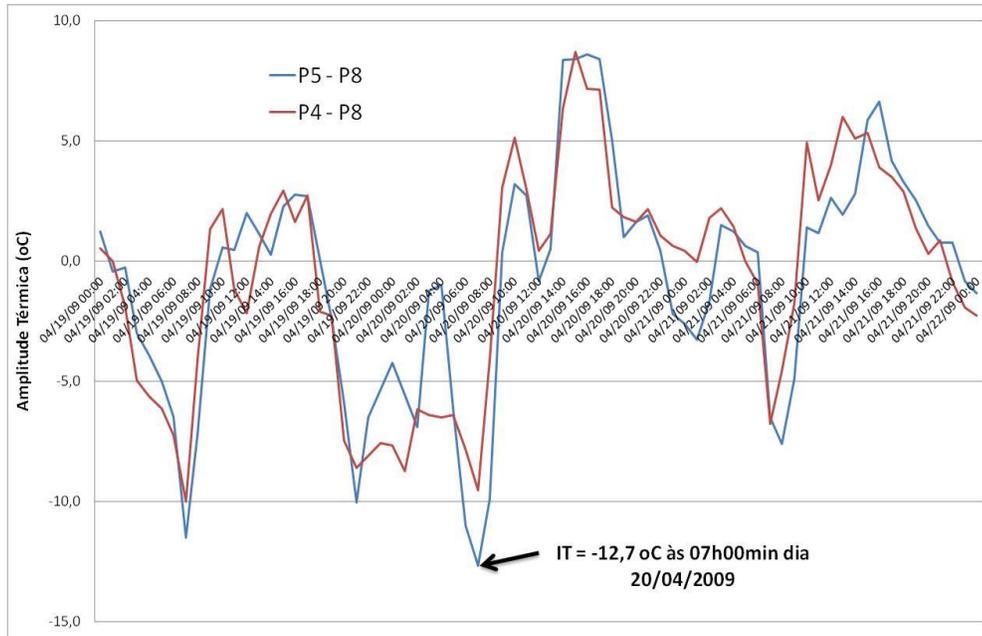


Figura 3: Variação da amplitude térmica entre P4 e P8 e P5 e P8 entre os dias 19 a 21 de abril de 2009 no Pico da Bandeira.

Observa-se também um ciclo diurno da ocorrência de IT. O período diurno apresenta sempre condição normal de variação vertical da temperatura do ar (P4 e P5 com valores mais elevados que P8), isso porque a atmosfera nessas condições de aquecimento basal tende a apresentar processos convectivos mais intensos *misturando* a camada de ar e se aquecendo de baixo para cima. No período noturno, em especial após algumas horas após o ocaso, o que se observa é uma inversão do perfil térmico da atmosfera próximo a superfície com a ocorrência de IT. Esses processos tendem a se intensificar nos momentos de maior resfriamento da superfície. O escoamento do ar frio e o acúmulo nas partes mais baixas do relevo intensificam a magnitude da IT.

A figura 4 apresenta a média horária da temperatura do ar entre P4 e P8 e também o desvio absoluto. Observa-se um ciclo diurno

bastante definido com valores positivos de desvio nos horários de temperaturas máximas (período diurno) e negativos no período de temperaturas mínimas (período noturno). Observa-se, ainda, uma intensificação da amplitude térmica com o período de máximo resfriamento coincidindo as maiores ITs com os valores mínimos de temperatura do ar, evidenciando maior acúmulo de ar frio nas partes mais baixas do terreno (no caso representado pelo P4). Considerando que no P4 é onde se localiza o acampamento dos turistas que fazem a escalada noturna para assistir ao nascer do sol do pico da Bandeira, a evidência de ocorrência das temperaturas mais reduzidas neste ponto pode ser uma informação importante no planejamento das atividades turísticas da região.

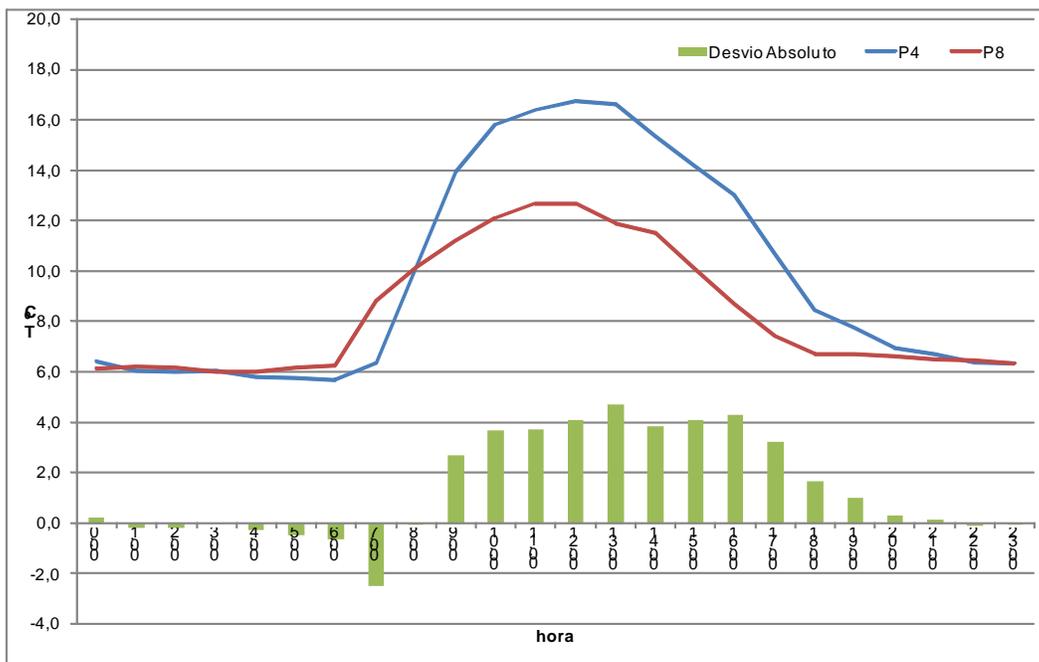


Figura 4: Temperatura do ar média horária entre P4 e P8 e desvio absoluto da temperatura do ar entre os dias 19/04/09 a 22/05/09 no pico da Bandeira.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ocorrência de inversão térmica no perfil topoclimático do Pico da Bandeira indica ciclo diuturno que responde aos momentos de aquecimento e resfriamento da superfície e da atmosfera. O período diurno apresentou variação vertical da temperatura do ar dentro do esperado, com P4 e P5 com valores mais elevados que P8, resultado do aquecimento basal da atmosfera que tende a apresentar processos convectivos mais intensos, enquanto no período noturno se destacou a presença de inversão do perfil térmico da atmosfera próximo a superfície. A configuração do perfil topográfico é um importante controle do clima em relação à ocorrência do processo de IT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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**, São Paulo, 45, 1974.

ARMANI, G.; GALVANI, E. Avaliação do desempenho de um abrigo meteorológico de baixo custo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, 2005.

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 AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Agência do Estado de São Paulo responsável pelo controle, fiscalização, monitoramento e licenciamento de atividades geradoras de poluição. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em 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, p.21-51, 1971.

GALVANI, E. , LIMA, N.G.B. A ocorrência inversões térmicas no perfil topoclimático do Pico das Agulhas Negras – RJ. IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 7, 2006. Rondonópolis. Anais... Rondonópolis: UFMT, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL – IBDF / FUNDAÇÃO BRASILEIRA PARA A CONSERVAÇÃO DA NATUREZA. **Plano de Manejo do Parque Nacional do Caparaó**. Brasília, 1981.

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, L. G.; TARIFA, J. R. O clima da serra de Ibitipoca, Sudeste de Minas Gerais. **Revista GEOUSP, Espaço e Tempo**, São Paulo, 11, pp.101-113, 2002

SELLERS, W.D. **Physical Climatology**. Chigago: The University of Chicago Press, 1974. 272p.