

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**ESPIROMETRIA NA AVALIAÇÃO DO SISTEMA  
RESPIRATÓRIO DE RUMINANTES EM AMBIENTE  
TROPICAL**

**Carolina Cardoso Nagib Nascimento**

Médica Veterinária

2016

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**ESPIROMETRIA NA AVALIAÇÃO DO SISTEMA  
RESPIRATÓRIO DE RUMINANTES EM AMBIENTE  
TROPICAL**

**Carolina Cardoso Nagib Nascimento**

**Orientador: Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Zootecnia.

2016

N244e Nascimento, Carolina Cardoso Nagib  
Espirometria na avaliação do sistema respiratório de ruminantes em ambiente tropical / Carolina Cardoso Nagib Nascimento. – Jaboticabal, 2016  
xiv, 80 p.: il. ; 28 cm

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2016

Orientador: Alex Sandro Campos Maia

Banca examinadora: Iran José Oliveira da Silva, Evaldo Antônio Lencioni Titto, Kênia Cardoso Bicego, Glauco de Souza Rolim

Bibliografia

1. Bovinos. 2. Caprinos. 3. Calorimetria Indireta. 4. Perda de Calor. 5. Sistema Respiratório. 6. Peso Corporal. I. Título. II. Jaboticabal – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 636.2/.3

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**CAROLINA CARDOSO NAGIB NASCIMENTO** – Nasceu no município de Uberlândia, Estado de Minas Gerais, no dia 12 de novembro de 1982. Em março de 2003 iniciou o curso de Graduação em Medicina Veterinária pela Universidade Federal de Uberlândia, graduando-se em março de 2008. Em julho de 2009 iniciou o curso de Pós-Graduação em Ciências Veterinárias (mestrado), com área de concentração em Produção Animal e ênfase em Biometeorologia Animal pela Faculdade de Medicina Veterinária – FAMEV/UFU, submetendo-se à defesa da dissertação de mestrado em dezembro de 2011. Em março de 2012 iniciou o curso de Doutorado em Zootecnia na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, Campus Jaboticabal, também com ênfase em Biometeorologia Animal, durante o qual foi bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). No período de outubro de 2014 a junho de 2015 realizou estágio no Departamento de Clínica Veterinária e Zootecnia da Universidade de Copenhague, Dinamarca, como participante do Programa Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), sob supervisão da pesquisadora Dr<sup>a</sup>. Anne-Helene Tausson.

Aos meus familiares e amigos que me apoiaram nesta jornada possibilitando a concretização deste trabalho dedico.

## **Agradecimentos**

A concretização desta tese foi feita não apenas pelas minhas mãos e sim pela ajuda de uma equipe e de pessoas que passaram e ainda estão presentes na minha vida pessoal e profissional, por isso gostaria de agradecer:

Ao meu orientador Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia pela orientação e auxílio na realização das coletas e confecção dos artigos oriundos desta tese;

Ao Prof. Dr. Roberto Gomes da Silva pelos ensinamentos que mesmo os poucos momentos que estivemos juntos foram de grande importância para o meu crescimento, é um privilégio para mim conhece-lo;

Aos meus colegas do grupo INOBIO que dividiram comigo os animais dos experimentos, auxiliaram nas coletas e dividiram ótimas horas de convívio fora e dentro do laboratório;

A Dr<sup>a</sup> Maria da Graça e a equipe da Apta de Ribeirão Preto – SP pela ajuda e empréstimo dos animais Jersey que possibilitou a realização de parte dos meus dados;

Ao Prof. Marcos Chiquitelli Neto e a equipe do grupo MANERA da FEIS – UNESP Ilha Solteira, SP pelo condicionamento e empréstimo dos animais Guzerá que possibilitou a realização de parte dos meus dados;

A todos do setor de Caprinocultura pelo empréstimo das cabras Anglo Nubianas que possibilitou a realização de parte dos meus dados;

Ao colega de laboratório Bruno Simão pela confecção das figuras de forma magnífica, mesmo estando longe e em tratamento nunca deixou de me ajudar, sua garra e maneira como superou seus obstáculos em 2015 são dignos de admiração;

A minha amiga e colega de Laboratório Angela Arduino, que sempre se mostrou disposta a ajudar e fazer com que as burocracias de uma instituição pública ficasse mais “leve”;

Ao amigo Vinícius Fonseca por toda a ajuda neste trabalhos e em todos os outros que fizemos juntos, espero que nossa parceria se mantenha por muitos anos;

A todos os professores da FCAV – UNESP Jaboticabal, que eu conheci e tive o prazer de assistir suas disciplinas e adquirir conhecimento que levarei por toda a minha profissão;

Aos professores que participaram das minhas bancas de defesa de projeto, qualificação e defesa de tese e que se propuseram a ajudar e fazer com que esta tese ficasse cada vez melhor;

As agências de fomento Capes e Cnpq, por me proporcionarem auxílio financeiro durante o meu doutorado na UNESP campus Jaboticabal e também no meu doutorado sanduiche pelo PDSE – Capes na Universidade de Copenhague.

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1 Estrutura e função do sistema respiratório.....	4
3.2 Princípios físicos da mecânica de fluidos .....	11
3.3 Técnicas de mensuração respiratória.....	14
3.4 Tamanho corpóreo e funções fisiológicas.....	21
3.5 Transferência de calor e massa.....	22
3.6 Transferência de calor e massa no trato respiratório.....	26
3.7 Modelagem em tecidos biológicos.....	28
3.8 Modelagem do sistema respiratório.....	28
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
6. CONCLUSÃO.....	74
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	75

**INSERIR CERTIFICADO COMITE DE ETICA**

## ESPIROMETRIA NA AVALIAÇÃO DO SISTEMA RESPIRATÓRIO DE RUMINANTES EM AMBIENTE TROPICAL

**RESUMO** – Objetivou-se a partir deste estudo avaliar a dinâmica das trocas térmicas ocorridas no trato respiratório de animais de interesse zootécnico (bovinos e caprinos), em ambiente tropical, utilizando a técnica de espirometria de fluxo contínuo com uso de máscara facial. Foram realizados quatro estudos de espirometria e calorimetria indireta com três raças da espécie bovina, Nelore, Guzerá e Jersey e uma da espécie caprina da raça Anglo-nubiana. A realização da espirometria e da calorimetria indireta foi feita por meio de uso de máscara facial ajustada ao focinho do animal. A produção de calor metabólico ( $q''_{MET}$ ), ventilação ( $V_E$ ), frequência respiratória ( $F_R$ ), volume respiratório corrente ( $V_{RC}$ ) e produção e consumo de  $CO_2$  ( $VCO_2$ ) e  $O_2$  ( $VO_2$ ), respectivamente, foram mensuradas simultaneamente, além das trocas de calor do animal por evaporação e convecção pelo trato respiratório com o meio ambiente. Avaliações de espirometria e calorimetria indireta com utilização de máscara facial em animais de produção em ambiente natural mostraram-se eficientes para as espécies estudadas uma função não linear entre  $V_{RC}$ ,  $V_E$ ,  $VO_2$  e  $F_R$  por unidade de peso e peso corporal foi encontrada; animais de menor peso corporal apresentam maiores  $V_{RC}$ ,  $V_E$ ,  $VO_2$  e  $F_R$  e conseqüentemente uma maior produção de calor metabólico por unidade de peso corporal do que animais maiores. Em faixas de temperatura do ar de 22 a 36 °C os animais Guzerá, Nelore, Jersey e Anglo Nubianas não tem um aumento significativo nas funções respiratórias porém, o volume de  $CH_4$  apresenta uma relação inversa com o aumento da temperatura do ar. As perdas de calor pelo trato respiratório por evaporação aumentaram com o aumento da temperatura do ar, sendo essa a principal via de perda de calor no trato respiratório. Modelos de regressão apresentados para estimar a evaporação respiratória em bovinos da raça Guzerá, Nelore, Jersey e caprino da raça Anglo Nubiana utilizando parâmetros ambientais e fisiológicos se mostraram bem eficientes nestas condições.

**Palavras-chave:** bovinos, caprinos, calorimetria indireta, perda de calor, sistema respiratório, peso corporal.

## EVALUATION OF RESPIRATORY TRACT USING SPIROMETRY METHODS IN RUMINANTS IN TROPICAL ENVIRONMENT

**ABSTRACT** – In order to study the respiratory physiology and the dynamics of the heat exchange occurred in the respiratory tract of livestock interest of animals in tropical environment using a continuous flow of spirometry technique with use of facial mask. Four studies of spirometry and indirect calorimetry were performed in two species of livestock interest animals, and these three races of bovine animals, Nellore, Guzerat and Jersey and a goats Anglo-Nubian breed. The spirometry and indirect calorimetry was performed by use of the face mask adjust to the animal's muzzle. The metabolic heat production ( $q''_{MET}$ ), ventilation ( $V_E$ ), respiratory rate ( $R_R$ ), tidal volume ( $V_T$ ) and production and consumption of  $CO_2$  ( $V_{CO_2}$ ) and  $O_2$  ( $VO_2$ ), respectively, were measured simultaneously, as well of the animal's heat exchange by convection and by evaporation with the respiratory tract environment. Spirometry and indirect calorimetry techniques with use of facial masks in livestock animals in a natural environment were effective for the species studied. A nonlinear function between  $V_{RC}$ ,  $V_E$ ,  $VO_2$  and  $F_R$  per unit weight as function of body weight was found and the lighter animals had a higher  $V_{RC}$ ,  $V_E$ ,  $VO_2$  and  $F_R$  and thus greater metabolic heat production per unit weight than largest animals. In air temperature between 22-36 °C the Guzerat, Nellore, Jersey and Anglo Nubian has no significant increase respiratory function, but the volume of  $CH_4$  has an inverse relation with air temperature. Also heat losses the respiratory tract by evaporation increased with increasing air temperature, and this is the main heat loss through the respiratory tract. Regression models presented to estimate the respiratory evaporation in cattle Guzerat, Nellore, Jersey and the Anglo Nubian goat using environmental and physiological parameters were well efficient in these conditions.

**Keywords:** body weight, cattle, goats, indirect calorimetry, heat loss, respiratory system.

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
<p><b>Tabela 1.</b> Média, valores mínimos e máximos da temperatura do ar (<math>T_A</math>, °C), pressão de vapor (<math>P_V</math>, kPa), umidade relativa (<math>U_r</math>, %) , temperatura radiante média (<math>T_{RM}</math>, °C) e radiação solar (<math>R_s</math>, <math>W\ m^{-2}</math>) observada durante os experimentos.....</p>	50
<p><b>Tabela 2.</b> Média geral (<math>\pm</math> erro padrão), valores mínimos e máximos do peso corporal (<math>B_W</math>, kg), Ventilação (<math>V_E</math>, <math>L\ s^{-1}</math>), frequência respiratória (<math>F_R</math>, resp.min<sup>-2</sup>), volume respiratório corrente (<math>V_{RC}</math>, L.resp<sup>-1</sup>), volume de <math>O_2</math> consumido (<math>VO_2</math>, <math>L\ h^{-1}\ animal^{-1}</math>), volume de <math>CO_2</math> produzido (<math>VCO_2</math>, <math>L\ h^{-1}\ animal^{-1}</math>), produção de calor metabólico (<math>q''_{met}</math>, <math>W.m^{-2}</math>) durante os experimentos.....</p>	54
<p><b>Tabela 3.</b> Média geral (<math>\pm</math> erro padrão), valores mínimos e máximos da temperatura do ar expirado (<math>T_{EXP}</math>, °C), ventilação (<math>V_E</math>, <math>L\ s^{-1}</math>), frequência respiratória (<math>F_R</math>, resp.min<sup>-2</sup>), pressão de vapor do ar expirado (<math>P_{EXP}</math>, KPa), evaporação respiratória (<math>q_{ER}</math>, <math>W\ m^{-2}</math>), convecção respiratório (<math>q_{CR}</math>, <math>W\ m^{-2}</math>), produção de calor metabólico (<math>q''_{met}</math>, <math>W.m^{-2}</math>) durante os quatro experimentos.....</p>	67

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1. Corte axial da traqueia (GETTY, 1986).....	5
Figura 2. Diagrama mostrando excursões respiratórias durante respiração normal e durante a inspiração máxima e expiração máxima (GUYTON, 2006).....	10
Figura 3. Pneumotacografia em anfíbios .....	15
Figura 4. Pletismografia realizada em sistema fechado em roedores.....	16
Figura 5. Utilização de bocal para espirômetro e clipe nasal (A) e máscara facial (B) para realização de espirometria.....	19
Figura 6. Taxas de consumo de oxigênio de vários mamíferos (SHIMIDT-NIELSEN, 2002).....	21
Figura 7. Perfil de velocidade ( $\delta_f$ ) e de temperatura ( $\delta_t$ ) na camada limite com Prandtl ( $Pr$ ) $> 1$ e $Pr < 1$ . (GOU et al., 1997).....	25
Figura 8. Representação esquemática do Sistema de Medidas Fisiológicas do Laboratório de Bioclimatologia em bovinos de corte (A), caprinos (B) e bovinos de leite (C).	39
Figura 9. Animais durante as coletas de dados com Sistema de medidas fisiológicas do Laboratório de Bioclimatologia Animal.....	40
Figura 10. Animal usando a máscara facial do Sistema de medidas fisiológicas do Laboratório de Bioclimatologia Animal.....	41
Figura 11. Animais durante o condicionamento da máscara.....	43
Figura 12. Média dos quadrados mínimos da temperatura do ar ( $T_A$ , °C), umidade relativa ( $U_R$ , %), radiação solar ( $R_S$ , $W$ $m^{-2}$ ) e temperatura radiante média ( $T_{RM}$ , °C) de acordo com as horas do dia (graus decimal) nos quatro experimentos.....	51
Figura 13. Ventilação ( $V_E$ , $L s^{-1}$ ) em função do peso corporal ( $B_W$ , kg) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.....	55

Figura 14. Volume respiratório corrente ( $V_{RC}$ , L resp <sup>-1</sup> ) em função do peso corporal ( $B_W$ , kg) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.....	56
Figura 15. Volume respiratório corrente por unidade de peso corporal ( $V_{RCp}$ , L resp. <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> ) em relação ao peso corporal ( $B_W$ , kg) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.....	57
Figura 16. Frequência respiratória por unidade de peso corporal ( $F_{Rp}$ , resp min <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> ) em relação ao peso corporal ( $B_W$ , kg) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.....	58
Figura 17. Proporção de O <sub>2</sub> expirado por unidade de peso corporal ( $P_pO_{2p}$ , % kg <sup>-1</sup> ) em relação ao peso corporal ( $B_W$ , kg) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.....	59
Figura 18. Ventilação respiratória ( $V_E$ , Ls <sup>-1</sup> ) em função da temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.....	60
Figura 19. Volume respiratório corrente ( $V_{RC}$ , resp min <sup>-1</sup> ) em função da temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.....	62
Figure 20. Frequência respiratória ( $F_R$ , resp min <sup>-1</sup> ) em função da temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.....	63
Figura 21. Volume de O <sub>2</sub> produzido ( $VO_2$ , L h <sup>-1</sup> animal <sup>-1</sup> ), volume de CO <sub>2</sub> consumido ( $VCO_2$ , L h <sup>-1</sup> animal <sup>-1</sup> ) e volume de CH <sub>4</sub> consumido ( $VCH_4$ , L h <sup>-1</sup> animal <sup>-1</sup> ) em relação à temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore,	64

Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.....	
Figura 22. Produção de calor metabólico ( $q''_{met}$ , $W m^{-2}$ ) em relação a temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos Anglo Nubiana.....	65
Figura 23. Média por quadrados mínimos da evaporação respiratória ( $q''_{ER}$ , $W m^{-2}$ ) e convecção respiratória ( $q''_{CR}$ , $W m^{-2}$ ) em relação a temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos Anglo Nubiana.....	68
Figura 24. Gradiente de temperatura ( $\Delta T$ , °C) em relação a hora do dia nos experimentos de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos Anglo Nubiana.....	69
Figura 25. Evaporação respiratória ( $q''_{er}$ , $W m^{-2}$ ) em relação à temperatura do ar de bovinos da raça Guzerá.....	70
Figura 26. Evaporação respiratória ( $q''_{er}$ , $W m^{-2}$ ) em relação à temperatura do ar (°C) de bovinos da raça Nelore.....	71
Figura 27. Evaporação respiratória ( $q''_{er}$ , $W m^{-2}$ ) em relação à temperatura do ar de vacas da raça Jersey.....	72
Figura 28. Evaporação respiratória ( $q''_{er}$ , $W m^{-2}$ ) em relação à temperatura do ar de caprinos da raça Anglo Nubiana.....	73

## 1. INTRODUÇÃO

Entender as trocas térmicas no sistema respiratório entre o animal e o ambiente tem sido o foco de vários estudos (McDowel, et al.1973; Maia et al. 2005; Robertshaw, 2006). Compreender esta dinâmica nos animais de produção dentro do seu ambiente natural de criação, sem controlar as alterações meteorológicas ocorridas ao longo do dia é de grande importância em estudos de termorregulação e equilíbrio térmico.

O estudo da fisiologia da respiração tem como base explicar diversos processos biológicos, entre eles a ventilação, trocas gasosas e a dissipação de calor e massa, que vem sendo discutidos em pesquisas na medicina veterinária e na aplicação de processos termodinâmicos nos seres vivos (Krog, 1916; Walker et al., 1961; Ferrannini, 1988; Diener, 1997). Nestes estudos, a partir de testes espirométricos, o volume respiratório corrente, frequência respiratória, ventilação-minuto, concentrações de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> do ar inspirado e expirado, têm-se avaliado o desempenho produtivo e tolerância ao calor dos animais de interesse zootécnico (Costa e Jamini, 2001; Miller et al., 2005; Watanabe,2009).

A espirometria é um método indireto amplamente aceito para medir as taxas metabólicas, especialmente em insetos, pássaros e mamíferos (Kristín e Gvoždík, 2012), além de possibilitar conhecer os volumes respiratórios e sua relação com outras variáveis fisiológicas e ambientais. Alguns trabalhos têm mostrado um aumento da atividade respiratória sob condições de estresse por calor e conseqüentemente, aumento no fluxo de ar através das vias respiratórias, diminuição na taxa de remoção alveolar do O<sub>2</sub> e aumento na liberação de CO<sub>2</sub> (McDowel et al. 1973; Maia et al. 2015; Finch et al.1980).

Juntamente com os estudos de espirometria, a modelagem matemática e seus conceitos físicos, que sempre foram amplamente utilizados na área de engenharia como ferramenta para demonstrar o funcionamento de máquinas e equipamentos, começaram a ser mais aplicadas no início do século XX, com a utilização desses modelos para a representação de sistemas biológicos como, por exemplo, o desenvolvimento da equação de biocalor proposta por Pennes (1948).

Modelagem de sistemas térmicos e sistema respiratório em humanos estão se tornando cada vez mais próximos da realidade biológica como nos modelos desenvolvidos por Wissler (1961), Ferreira e Yanagihara (2009) para sistemas térmicos e Hanna (1983), Albuquerque-Neto, Yanagihara e Turri (2009), Albuquerque-Neto (2010) para sistemas respiratórios. Alguns modelos de transferência de calor pelo trato respiratório descrevem que o ar é expirado numa temperatura igual a temperatura corporal profunda (McARTHUR, 1987). Entretanto, durante a expiração, as superfícies do trato respiratório superior, antes resfriadas por evaporação e convecção no momento da inspiração, resfria o ar que deixa a região alveolar com temperatura igual a corporal, fazendo com que a umidade ali se condense. Assim, o ar é exalado completamente saturado à uma temperatura menor que a corporal profunda (SILVA, 2000).

A taxa total da perda de calor pela respiração é dependente do fluxo respiratório e da temperatura e umidade do ar inspirado, sendo a temperatura do ar o principal fator na troca de calor no sistema respiratório (WISSLER, 1964; STEVENS, 1981; da SILVA et al., 2002; MAIA et al., 2005). Outros fatores importantes para estas trocas térmicas são a taxa de ventilação por minuto, a temperatura das vias aéreas, alterações vasomotoras e na membrana da mucosa (CRAMER,1957). Contudo, a perda de calor através da respiração pode ser minimizada pela geometria das vias aéreas, o fluxo e refluxo padrão de movimento do ar através das mesmas e a capacidade calorífica baixa do ar (GRAHN e HELLER, 1997).

As pesquisas sobre os aspectos termodinâmicos do trato respiratório em mamíferos têm sido conduzidas com animais anestesiados (Mitchell et al., 1972), em ambiente controlado (Findlay, 1957) ou utilizando máscaras faciais ventiladas por um período curto de tempo (Young, 1975). Com isso, faz-se necessário suprir a pouca informação detalhada sobre as respostas respiratórias em ruminantes nas condições naturais em ambiente tropical e suas relações com o meio ambiente.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

Avaliar a dinâmica respiratória e de trocas térmicas ocorridas no trato respiratório de ruminantes sob condições de criação em ambiente não controlado utilizando a técnica de espirometria com uso de máscara facial.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Descrever a técnica de espirometria em pequenos e grandes ruminantes em condições ambientais não controladas;

Determinar o volume pulmonar respiratório, frequência respiratória, volume de oxigênio consumido e dióxido de carbono produzido, além da produção de calor metabólico em bovinos e caprinos;

Analisar as relações da ventilação, frequência respiratória, volume respiratório corrente, volume de  $O_2$  consumido e volume de  $CO_2$  produzido com o peso corporal de ruminantes em ambiente tropical;

Avaliar as trocas térmicas ocorridas por convecção e evaporação no trato respiratório;

Por meio de medidas fisiológicas e ambientais simples desenvolver equações de predição para estimar os fluxos de calor sensível e latente através do trato respiratório de ruminantes criados em ambiente tropical ;

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Estrutura e Função do Sistema Respiratório

##### 3.1.1 Aspectos Anatômicos

O sistema respiratório dos ruminantes é constituído de narinas, cavidade nasal, na qual se localizam os meatos nasais, laringe, traqueia e a cavidade torácica, onde estão alojados os pulmões (GETTY, 1986). O trato respiratório dos mamíferos é dividido em vias de condução e vias de trocas gasosas. O primeiro é composto pela cavidade nasal, laringe e traqueia, sendo responsável pelo processo de passagem, aquecimento (inspiração) e resfriamento (expiração) do ar, enquanto que o trato inferior se divide em pulmão e árvore bronquial, o qual desempenha a função das trocas gasosas. (SOBOTTA, 2013)

Do ponto de vista funcional, distinguem-se em zona de condução do sistema respiratório, constituída por uma série de cavidades e condutos interconectados (nariz, faringe, laringe, traqueia brônquio e bronquíolos terminais), e a zona respiratória, onde ocorre a troca gasosa (bronquíolos respiratórios, ductos alveolares, sacos alveolares e alvéolos). A partir da traqueia, as vias aéreas dividem-se para formar uma estrutura arborescente, produzindo 24 divisões da traqueia aos sacos alveolares, sendo as 17 primeiras integradas a parte condutora do sistema respiratório e as outras sete divisões a zona de trocas gasosas (CÓRDOVA, 1992).

A traqueia é um órgão tubular, formado por uma série de anéis cartilagosos, unidos entre si pelos ligamentos anulares, que proporciona certa flexibilidade ao órgão, o qual permite aos animais realizarem movimentos de pescoço com boa amplitude (GUIMAREÃS et al., 2012). Esse órgão apresenta uma mucosa limitada por epitélio de células colunares pseudo-estratificadas e ciliadas, que atuam na linha de defesa. Para que não ocorra seu colapso, que ocorreria quando são produzidas pressões intratorácicas positivas durante expirações forçadas, a traqueia possui uma quantidade considerável de cartilagem hialina, formando anéis que variam em número e forma de uma espécie para outra e mesmo entre espécies, dispostos um em cima do outro ao longo de toda sua extensão (CÓRDOVA, 1992).

Este órgão pode ter um comprimento que varia de cerca de 65 cm para bovinos e 25 cm para ovinos e caprinos (GETTY, 1986). A traqueia apresenta de 48 a 60 placas ou anéis cartilagosos. Nos bovinos, as placas se apresentam dobradas, de modo que as suas extremidades livres quase se tocam, formando assim o contorno de sua secção transversal uma elipse. No caprino as placas se apresentam na forma de “U”. Em ovinos, o contorno da secção transversal da traqueia difere de uma região para outra, sendo que na laringe o contorno é quase cilíndrico, no terço médio da traqueia apresenta-se em forma de “U”, como nos caprinos. No terço caudal da traqueia, as extremidades livres dorsais das placas se estendem formando uma crista dorsal. O músculo traqueal se estende transversalmente fixando-se na face interna das placas cartilagosas (GETTY, 1986).

As estruturas anatômicas do trato respiratório e um corte axial da traqueia podem ser observados na figura 1.

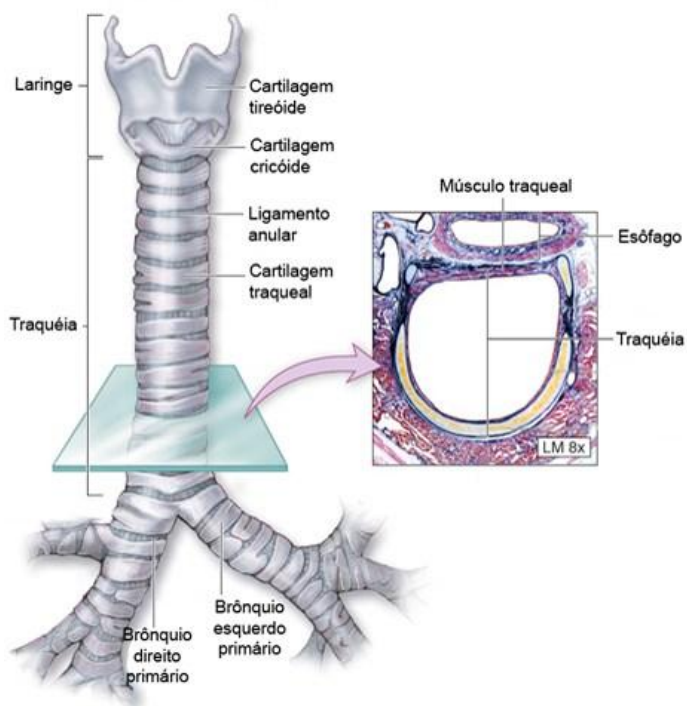


Figura 1. Corte ventral da traqueia (GETTY, 1986).

### **3.1.2 Aspectos Fisiológicos**

Evidentemente, a respiração fornece oxigênio aos tecidos e remove dióxido de carbono dos mesmos (GUYTON, 2006). Ademais, além de participar das trocas gasosas e conseqüentemente da regulação do pH sanguíneo, o sistema respiratório possui receptores olfatórios, filtra o ar inspirado, defende o organismo contra agentes externos, atua na produção de sons, promove eliminação de água e calor e também está envolvido no metabolismo de certos compostos orgânicos (MARÍ, 2006).

Segundo Manço (1998), o sistema respiratório necessita de dois sistemas que trabalhem juntos para que as funções de trocas gasosas sejam feitas de forma correta: um sistema respiratório, que garante a circulação de ar por todo o trato respiratório e um sistema circulatório responsável pelo suprimento sanguíneo.

#### **3.1.2.1 Vias aéreas**

As vias aéreas têm como principal função conduzir o ar até os pulmões para que ocorram a trocas gasosas de fato. Estas têm também a função de aquecer e umidificar o ar inspirado (NIELSEN, 2002).

Esta umidificação é necessária para que ocorra uma diluição de todos os gases presentes no ar inspirado fazendo que a pressão dos gases fique inferior à pressão atmosférica do local (GUYTON, 2006).

Entre a traqueia e os alvéolos as vias aéreas são divididas 23 vezes, sendo que as primeiras 16 gerações formam a passagem para o ar para e do exterior do corpo, estas múltiplas gerações diminuem sua área de secção transversal à medida que se aproximam dos alvéolos, conseqüentemente, a velocidade do fluxo de ar nas vias aéreas menores diminuem para valores muito baixos (GANONG, 1983).

#### **3.1.2.2 Ventilação Pulmonar**

Entende-se por ventilação o processo automático e rítmico que gera movimentos de entrada e saída de ar por todo trato respiratório. É regulado pelo sistema nervoso central e depende da contração e relaxamento de vários músculos: diafragma, músculos da grade costal e caixa torácica e músculos abdominais (SOARES et al., 2002)

### **3.1.2.2.1 Mecanismos da ventilação**

A cavidade torácica pode se expandir e contrair por duas maneiras: pela contração e relaxamento do diafragma assim aumentando e diminuindo o tamanho da cavidade torácica, e pela elevação ou abaixamento das costelas e músculos intercostais, com isso aumentando o diâmetro da caixa torácica (GUYTON, 2006). Um movimento respiratório normal é feito preferencialmente apenas pelo movimento do diafragma, sendo responsável por 75% da variação do volume intratorácico (GANONG, 1983).

Segundo Soares et al. (2002), durante a inspiração, que é considerada a face ativa da ventilação, ocorre a contração do diafragma e dos músculos intercostais externos. A expansão torácica é responsável pela diminuição da pressão no espaço pleural que tem, como consequência, um movimento de expansão pulmonar passiva, que, por sua vez, gera uma diminuição da pressão nos espaços aéreos terminais. Atuando como força motriz para a entrada de ar até que a pressão nos espaços aéreos se iguale a pressão atmosférica.

A expiração é um processo predominantemente passivo, dependente de forças de retração elástica. A ventilação corrente não depende da atividade muscular, apesar de, na sua fase inicial, haver uma contração dos músculos inspiratórios que diminui as forças de retração a expiração (SOARES et al., 2002).

Alguma parte do ar que entra durante a inspiração nunca alcança as vias áreas de trocas gasosas, ou seja, bronquíolos e alvéolos, simplesmente preenchem as vias aéreas como cavidade nasal, faringe e traqueia. Sendo essas áreas e esse ar denominados de espaço morto. Durante a expiração, o ar no espaço morto é o primeiro a ser expirado (GUYTON, 2006).

### 3.1.2.3 Circulação Pulmonar

O volume de sangue circula pelos pulmões é em torno de 450 ml, ou seja, 9% do volume total sanguíneo de todo o sistema circulatório. Aproximadamente 70 ml deste volume pulmonar estão nos capilares pulmonares e o restante é dividido em partes semelhantes entre as artérias e veias pulmonares (GUYTON, 2006).

Durante o exercício físico, o fluxo sanguíneo pode aumentar de 4-5 litros minuto<sup>-1</sup> em um adulto em repouso para até 30-40 litros minuto<sup>-1</sup> durante exercício máximo.

Segundo Grahn et al. (1984) a área da superfície de trocas gasosas dos alvéolos em um ser humano adulto é de aproximadamente 40-60 vezes maior do que a área de superfície total de pele. Todo o sangue circulante passa através das superfícies de permuta de gás dos pulmões e, em seres humanos em repouso, o ar nos pulmões passa mais de 10-12 vezes por minuto.

### 3.1.3 Capacidade e Volumes Pulmonares

Para se conhecer a dinâmica da ventilação pulmonar, esta foi dividida didaticamente em volumes e capacidades pulmonares.

#### 3.1.3.1 Volumes Pulmonares

Volumes são descritos como volume corrente ( $V_{rc}$ ) que constitui o ar que entra e sai do pulmão em uma única respiração. A partir desse volume juntamente com a frequência respiratória pode-se conhecer o volume- minuto ou ventilação pulmonar ( $V_E$ ) (GUYTON, 2006).

Este volume corrente pode variar em relação à espécie, sexo, tamanho, posição corporal e atividade metabólica (SOARES et al., 2002) como também com a temperatura e umidade do ambiente (da SILVA e CAMPOS MAIA, 2013). Em humanos adultos em repouso o volume corrente e ventilação são respectivamente 0,5 L resp<sup>-1</sup> e 6 L min<sup>-1</sup> (SOARES et al., 2002). Para outras espécies, os valores do

volume corrente e ventilação são, respectivamente, em vacas Jersey lactantes de 2,31 L resp<sup>-1</sup> e 96 L min<sup>-1</sup> (McDOWELL et al.,1973), ovelhas 0,2 L resp<sup>-1</sup> e 30 L min<sup>-1</sup> (HALES e WEBSTER, 1967).

Além dos volumes descritos acima podem – se encontrar ainda os volumes de reserva inspiratória (Vri) que é mensurado quando o ar inspirado é feito com a máxima inspiração com um excesso do volume corrente (GANONG, 1981), volume de reserva expiratória (Vre) volume adicional que se é expirado durante uma expiração forçada e volume residual (Vr) como sendo o ar que não se consegue expirar, ou seja, o ar que permanece nos pulmões (CÓRDOVA, 1992).

### **3.1.3.2 Capacidades Pulmonares**

Ao descrever ciclos pulmonares, muitas vezes considera-se dois ou mais volumes, sendo as capacidades respiratórias a junção desses volumes já descritos. São divididas em capacidade inspiratória que é a somatória do volume corrente e o volume reserva inspiratório, a qual nesta fase, o pulmão e a caixa torácica está com sua capacidade de distensão máxima; capacidade residual funcional, sendo esta a somatória do volume de reserva expiratório e do volume; capacidade vital residual representada pelos três volumes de reserva inspiratório, corrente e residual; capacidade pulmonar total sendo a máxima quantidade de ar que pode existir no pulmão sendo representada pela capacidade vital e o volume residual (GUYTON, 2006).

Todos os volumes e capacidades variam de acordo com a espécie, tamanho, peso e sexo e podem ser observadas na Figura 2.

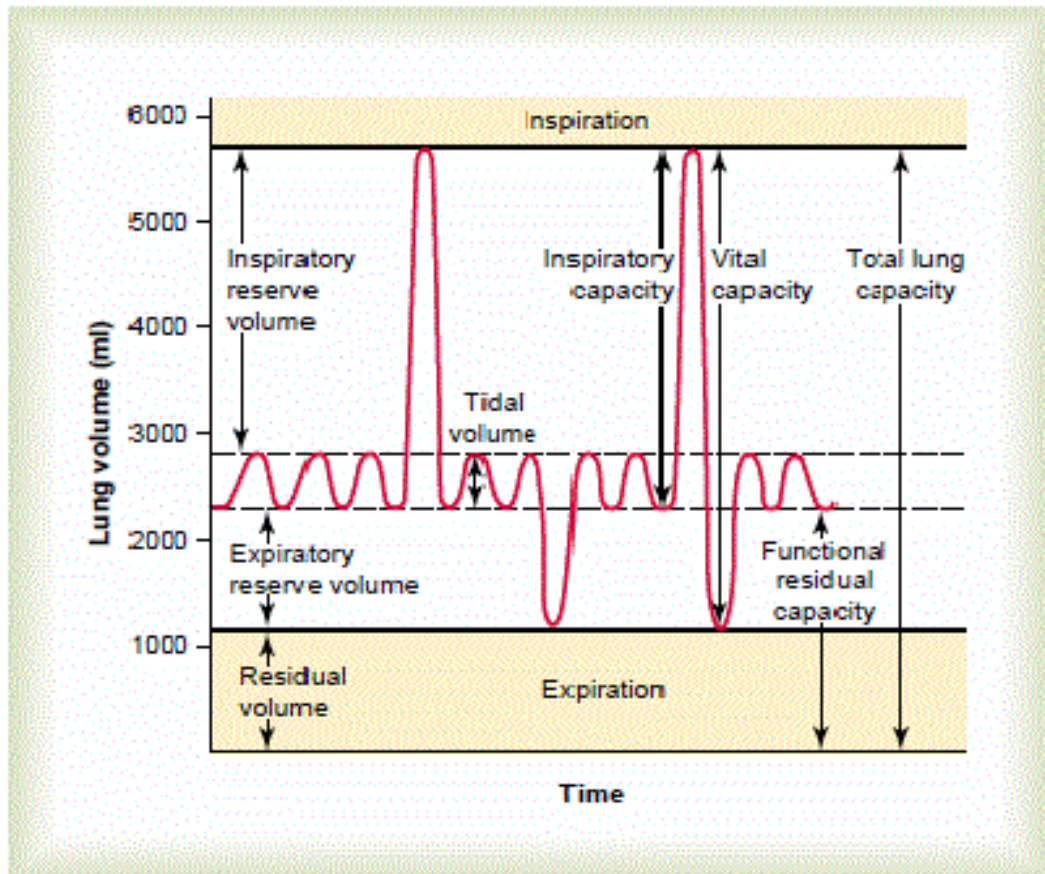


Figura 2. Diagrama das excursões respiratórias durante respiração normal e durante a inspiração máxima e expiração máxima (GUYTON, 2006).

### 3.1.4 Espaço morto anatômico e fisiológico

O espaço na área de condução das vias aéreas que é ocupado por ar que não participa das trocas gasosas nos alvéolos é denominado espaço morto respiratório (GANONG, 1981).

Representado por 30% do ar que entra pelas vias aéreas durante uma inspiração não forçada e que permanece na zona de condução é designado como espaço morto anatômico (GUYTON, 2006).

Durante a expiração, o ar que se encontra no espaço morto é expirado primeiro, depois o ar que atingiu os alvéolos é expirado. Por isso, o espaço morto é bastante desvantajoso para remover os gases expiratórios com maior concentração de  $\text{CO}_2$  dos pulmões (GUYTON, 2006).

O pulmão ideal teria um acoplamento perfeito entre a ventilação e o fluxo sanguíneo ( $V/Q$ ) em todas as regiões, mas não é isto que se verifica, mesmo no indivíduo normal. Há um desvio em relação ao ideal, que é normal e fisiológico. Logo, os volumes ventilatórios alveolares não entram totalmente em contato com capilares pulmonares e, portanto, parte dele não efetua trocas gasosas. O somatório deste volume desperdiçado com o espaço morto anatômico constitui o espaço morto fisiológico (SOARES et al., 2002).

## **3.2 Princípios Físicos da Mecânica de fluidos**

Para um perfeito conhecimento dos processos envolvidos durante a respiração faz-se necessário um estudo das leis que regem a dinâmica de fluidos.

### **3.2.1 Definição de Fluido**

A matéria na superfície da Terra é constituída de dois estados: sólido e fluido. Sendo que a diferença maior entre os dois está na força de coesão entre as moléculas e a que nele se encontram (WHITE, 2002). Um estado de uma matéria pode ser identificado ou descrito por algumas propriedades macroscópicas, tais como temperatura, pressão e massa específica (WINLEY e GORDON, 1994).

Um fluido pode estar em dois estados, líquidos ou gasosos e ambos não resistem às forças de cisalhamento, porém com relação às forças de coesão entre as moléculas no estado gasoso é desprezível e o mesmo pode ser comprimido, e ainda não apresentar um volume definido (ÇENGEL, 2009).

Outra forma de definição de fluido é através da propriedade de deformação da matéria, pois em um fluido as forças necessárias para deformar um fluido diminuem a uma proporção que a velocidade de deformação tende a zero (SPURK e AKSEL, 2008).

### **3.2.2 Lei Geral dos Gases (Gases Ideais)**

Os gases são mais compressíveis que os líquidos, sobre este aspecto eles tem uma relação direta entre a temperatura e pressão, e são regidos pela lei Geral dos gases ideais (GANONG, 1983).

$$pV = nRT \quad (1)$$

Sendo:

p = pressão absoluta, Pa;

V= volume, m<sup>3</sup>;

n= numero de mols;

R = constante do ar aprox. 8,31 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>;

T = temperatura, K.

A constante do gás, R é função do tipo de gás que está sendo considerado e está relacionada com a massa molecular do gás (MUNSON et al., 2004).

### 3.2.3 Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli é a equação que rege o escoamento de um fluido, sendo originada da segunda Lei de Newton (F = m.a) ao movimento da partícula fluida (MUNSON, 2004), sendo uma equação que relaciona pressão, velocidade e altura em um fluido sem atrito (SPURK e AKSEL, 2008).

A equação de Bernoulli pode ser escrita da seguinte maneira (SPURK e AKSEL, 2008):

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2}V_1^2 + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2}V_2^2 + gZ_2 = K \quad (2)$$

Sendo:

P = Pressão estabelecida no ponto 1 e 2, Pa

ρ = densidade do fluido, kg m<sup>-3</sup>

$V$  = velocidade do Fluido no ponto 1 e 2  $\text{m s}^{-2}$

$g$  = força gravitacional,  $\text{m s}^{-2}$

$Z$  = altura do ponto 1 e 2, m

$K$  = constante

### 3.2.4 Lei de Poiseulle

O movimento de fluidos é governado pela lei de Poiseulle, proposto pelo físico francês Poiseulle para o escoamento de um fluido com certa viscosidade em regime laminar no interior de um tubo cilíndrico horizontal e reto, com raio interno constante, pode ser comparado à relação entre a queda de tensão ( $V$ ) e a corrente elétrica ( $A$ ) aplicada a um componente elétrico que obedece a lei Ohm (RESNICK et al., 2002). Assim em termos físicos, a lei de Poiseulle em correspondência a Lei de Ohm, apresenta a queda de pressão  $\Delta P$  como à queda de tensão elétrica  $\Delta V$  no dispositivo de estudo a vazão  $\phi$  como a corrente elétrica  $I$ , e a partir destas cria-se a correspondência à resistência elétrica denominada neste trabalho de resistência hidráulica, tal que a partir da lei de Poiseulle em função da vazão, conforme equação:

$$\Phi = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot r^2}{\eta \cdot L \cdot 8} \quad (3)$$

Sendo:

$\phi$  = vazão do fluido,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

$\Delta P$  = diferença de pressão entre as extremidades, Pa

$\pi = 3,1415$

$r$  = raio do tubo, m

$\eta$  = viscosidade do fluido,  $\text{Pa s}^{-1}$

$L$  = comprimento do tubo, m.

### 3.3 Técnicas de mensuração respiratória

Para se conhecer os volumes, capacidades respiratórias, resistência pulmonar e de um modo geral toda a parte mecânica da ventilação são utilizados técnicas que possibilitem a mensuração de forma mais precisa.

Considerando que métodos de avaliação do sistema respiratório podem contribuir, tanto para o entendimento da complexa integração deste sistema com a atividade física (WATANABE et al., 2009) quanto para a detecção de alterações que podem influenciar o desempenho atlético competitivo ou diagnosticar doenças (ENRIGHT et al., 1991; FERGUNSON et al., 2009; PEREZ, 2013), como também na mensuração de metabolismo corporal e transferência de calor (MAIA et al., 2015).

As técnicas mais utilizadas para mensurar os volumes e capacidades pulmonares são: Pneumotacografia, Pletismografia e Espirometria que são descritas separadamente nos sub-itens abaixo:

#### 3.3.1 Pneumotacografia

O pneumotacógrafo é um sensor de fluxo que utilize de mecanismos de diferença de pressão para mensurar os fluxos respiratórios, sendo formado por tubos de acrílico cilíndrico que deve ser conectado entre o tubo endotraqueal e a peça em “Y” localizada na parte distal do circuito proveniente do respirador ou acoplado a uma máscara diretamente na narina como mostra a Figura 3 (INSTITUTO FIO CRUZ).

A ventilação pulmonar é diretamente medida pelo pneumotacógrafo, que é baseado no princípio de Poiseulle, ou seja, que o fluxo laminar de um gás é proporcional ao gradiente de pressão através de um tubo. A diferença de pressão através do tubo será medida por meio de um transdutor diferencial de pressão (BRANCO et al., 20XX).

Findlay (1956) em investigação de atividade respiratória com animais em estresse térmico verificou frequência respiratória elevada (FR), acima de 200 resp min<sup>-1</sup>. Equipamentos convencionais que dependem de válvulas mecânicas e medidores de fluxo para mensurar volumes respiratórios não são inteiramente

satisfatórios, pois em altas FR, esses equipamentos oferecem uma grande resistência a respiração. Esses problemas foram avaliados em um estudo com bovinos utilizando um pneumotacógrafo que apresentava alta estabilidade e boa acurácia para respirações que variaram entre 30 a 240 resp minuto<sup>-1</sup> (NISBET, 1955).

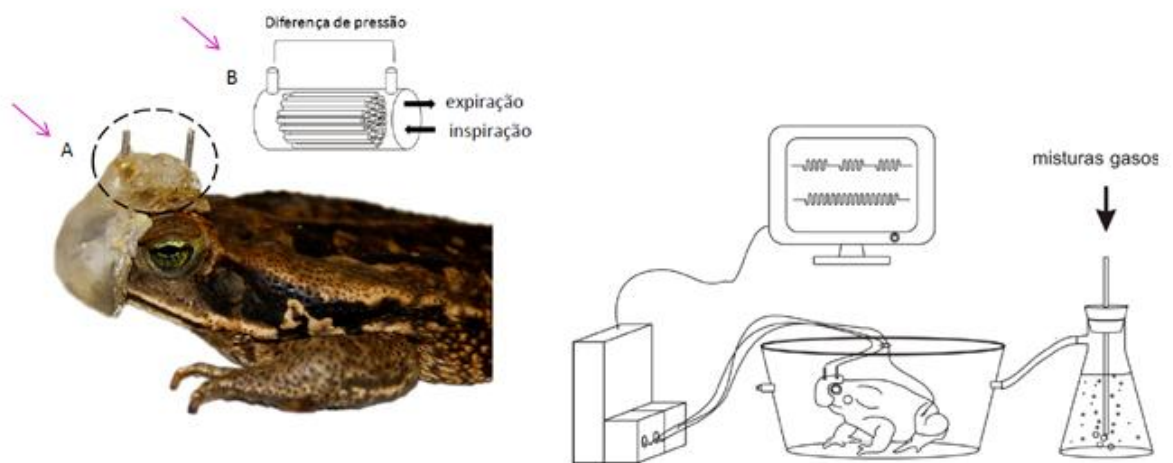


Figura 3. Pneumotacografia em anfíbios.

### 3.3.2 Pletismografia

A pneumotacografia e a espirometria avaliam volumes pulmonares mobilizáveis, não conseguindo definir por completo todos os volumes e capacidades envolvidas na ventilação, ficando fora de análise o volume residual e as capacidades que o incluem.

A determinação em laboratório dos volumes pulmonares estáticos pode ser feita pelo processo de pletismografia. A pletismografia de corpo inteiro determina o volume de gás torácico bem como a resistência das vias aéreas. Os pletismógrafos podem ser de pressão variável e volume constante, volume variável e pressão constante e de fluxo variável com volume e pressão constantes. Os primeiros são os mais comuns (PEREIRA e MOREIRA, 2000).

Durante a pletismografia corporal o indivíduo encontra-se fechado numa cabine (Figura 4) que se encontra especialmente equipada para medir pressão, fluxo

e/ou variações de volume. Neste método, as mensurações de diferença de pressão são feitas pela diferença de temperatura entre o ar expirado e o ar inspirado.

Este teste é considerado um teste áureo, sendo seus resultados para mensuração de Capacidade Pulmonar Total (CPT) melhor na pletismografia do que em outros testes como o teste de respiração única com hélio (TDHe), sendo que este se aproximava dos valores medidos em pletismografia apenas adicionado com uso de broncodilatadores (MANCOPES et al., 2000).

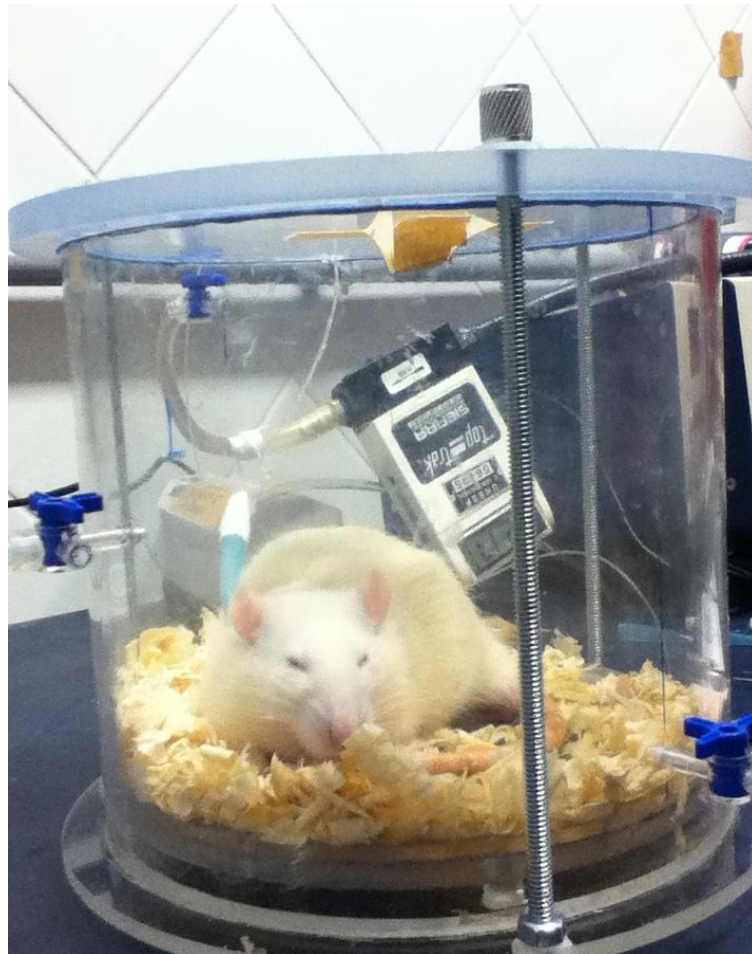


Figura 4 – Pletismografia realizada em sistema fechado em roedores (foto: próprio autor)

### 3.3.3 Espirometria

Um método utilizado para estudar a ventilação pulmonar consiste em registrar o volume de ar que se desloca para dentro e para fora dos pulmões, sendo o método denominado espirometria (GUYTON, 2006).

Em linhas gerais, o funcionamento do sistema de espirometria pode ser descrito como uma alteração da pressão de entrada do sistema que induz um fluxo através do tubo de conexão até a câmara onde se encontra o sensor, causando uma deflexão na membrana do mesmo. Esta deflexão é convertida em sinal elétrico por um transdutor, este sinal é posteriormente processado e o sinal resultante é então utilizado como indicação da pressão existente na entrada do tubo e convertido em volume respiratório (MELO et al.,1997).

Segundo o Consenso de Espirometria (1996), existem espirômetros de sistema aberto e fechado, no qual o aberto é realizado uma inspiração máxima fora do sistema e só após ela é iniciado a espirometria, já o sistema fechado, o indivíduo inspira e expira normalmente no aparelho. Os espirômetros podem trabalhar com deslocamento de volume, onde é calculada a diferença de volume do ar expirado no interior do aparelho ou por sensores de fluxo, como os pneumotacógrafos, utilizando-se de vários princípios físicos para produzir sinal proporcional ao fluxo de gás.

Dentre as formas de organizar a espirometria é possível classificá-la em: simples ou convencional, que pode ser estática ou dinâmica e por análise de gases, também denominada completa.

A espirometria completa ou por análise de gases é capaz de fornecer todos os volumes e capacidades possíveis, pois permite identificar o volume residual (VR), que, em conjunto com os demais volumes e capacidades obtidos, torna possível obter valor da capacidade pulmonar total (CPT). Apesar de fornecer o maior número de dados volumétricos do sistema respiratório, esta técnica é bastante onerosa sendo utilizada em casos clínicos especiais (COSTA e JAMAMI, 2001).

Já a espirometria simples ou convencional possibilita avaliar todos os volumes, capacidades e fluxos diretamente, com exceção do VR, fornecendo informações sobre a função pulmonar e, como tal, tem sido utilizada rotineiramente em clínicas, consultórios, hospitais e em laboratórios de pesquisa aplicada (COSTA e JAMAMI, 2001).

Segundo os mesmos autores a espirometria convencional pode ser dividida em estática ou dinâmica. A primeira não permite avaliar todas as condições da função pulmonar, entretanto, fornece alguns volumes importantes, como, por

exemplo, a capacidade vital (CV), a espirometria dinâmica envolve, além de volumes e capacidades, a velocidade com que o ar deixa os pulmões, isto é, o fluxo aéreo ou fluxo expiratório, que significa o tempo que uma quantidade de ar leva para passar pelas vias aéreas e chegar à boca.

Para um bom controle dos valores de fluxo-volume e de ventilação respiratória, um dos requisitos para se obter valores corretos na espirometria é a calibração do aparelho que deve ser feita diariamente com volumes conhecidos (seringa de 3 litros), além de problemas com vazamentos no espirômetro (MILLER et al., 2005).

Estudos em espirometria feitos em humanos com utilização de peça bucal e grampo nasal foram utilizados para se conhecer a capacidades e volumes de humanos saudáveis, e consideraram o método prático e eficaz para avaliação clínica de pacientes (KORY et al., 1961)

Ferguson et al. (2000), afirmaram que para humanos não há efeitos colaterais no teste de espirometria e um menor desconforto ocasional. No entanto, a confirmação anormal e resultados falso negativos em alguns pacientes fumantes podem conduzir a alterações no estilo de vida e de trabalho e além do risco de reforçar o hábito de fumar em pacientes fumantes que apresentaram exames normais para testes de espirometria.

#### **3.3.4 Utilização de Máscara Facial na Espirometria**

Muitas pesquisas e análises clínicas utilizam a espirometria como técnica e para realização da mesma utiliza-se juntamente a máscara facial ou um bocal para espirômetro com obstrução das narinas com uso de um grampo (Figura 5).

**A****B**

Figura 5. Utilização de bocal para espirômetro e clipe nasal (A) e máscara facial (B) para realização de espirometria. Autor (A): <http://inspirar.com.br/blog/como-fazer-exame-de-espirometria>. Autor(B): <http://scienceblogs.com/clock/2007/04/11/in-memori-am-knut-schmidtnielse/>

Porém, muitos autores relatam que o uso desses equipamentos para mensuração atrapalha o padrão normal respiratório. Segundo Judith et al. (1982), respirações com utilização de bocal respiratório e presilha nasal resultam em uma redução da frequência respiratória um aumento no volume corrente sem uma ocorrência de alteração no volume minuto em humanos.

Estudos comparando uso de máscara facial e bocal respiratório constataram que em ambos induziram um aumento no volume corrente e no volume minuto. Porém com a utilização da máscara facial a adição de um o espaço morto aumentou o volume corrente (ASKANAZI et al., 1980). Collie (1992) avaliando mecanismos de

ventilação em vacas utilizou a máscara facial juntamente com a espirometria com mecanismos de mensuração e para reduzir os problemas relatados por outros autores as máscaras eram bem fixas a face dos animais e o espaço morto não excedia 25% do volume corrente.

Askanazi et al.(1980) relatam que o uso de bocal respiratório impossibilita a realização de mensurações das trocas gasosas, mensuração tal que pode ser feita com a máscara facial para cálculo de metabolismo corporal como o realizado nos trabalhos de Maia et al. (2015) com cabras no Nordeste brasileiro. Sendo a espirometria bastante útil neste sentido, pois segundo da Silva e Campos Maia (2013), a maior dificuldade para estimação do calor metabólico que utiliza equações como a desenvolvida por Brouwer (1965) seria a determinação dos volumes correntes e frequência respiratória.

O uso de máscara facial para avaliação de desempenho físico e para determinação de metabolismo corporal é amplamente usado em animais.

Watanabe et al. (2009) utilizaram a espirometria com máscara facial para avaliar teste de exercício progressivo em esteira com equinos avaliando a troca gasosa respiratória pela mensuração do consumo de oxigênio ( $VO_2$ ), dióxido de carbono produzido ( $VCO_2$ ) e quociente respiratório (QR), e determinou-se o consumo máximo de oxigênio ( $VO_{2max}$ ).

Estudos com vacas Jersey e cruzadas foi realizado com utilização de máscara facial e espirometria para avaliar as relações dos padrões respiratórios como resposta de tolerância ao calor de vacas em diferentes estágios de lactação, relatando que a frequência respiratória seria um menor indício de tolerância ao calor que o volume respiratório (McDOWELL et al., 1953).

Em estudo com aves, Nascimento et al. (2015), relataram que o uso de máscara facial em aves com o isolamento apenas do bico podem causar desconforto ao animal e estarem sujeitas a vazamentos, sendo que o melhor dispositivo para realização de espirometria em aves seria a utilização de um capuz ventilado, que envolve toda a cabeça do animal.

### 3.4 Tamanho corpóreo e funções fisiológicas

Ao analisar animais pequenos e grandes em relação à taxa metabólica e conseqüentemente ao consumo de oxigênio nota-se uma diferença entre esses animais como demonstrado por Schmidt-Nielsen, 2002, em que animais grandes como, por exemplo, as baleias podem ficar submersas por duas horas ou mais enquanto pequenos animais mergulhadores como musaranho aquático fazem mergulhos que duram não mais que 30 segundos. Isso por que em animais menores a taxa de consumo de oxigênio relativa ao tamanho corpóreo é maior que em animais maiores como mostra a figura 6 (SCHIMIDT-NIELSEN, 2002).

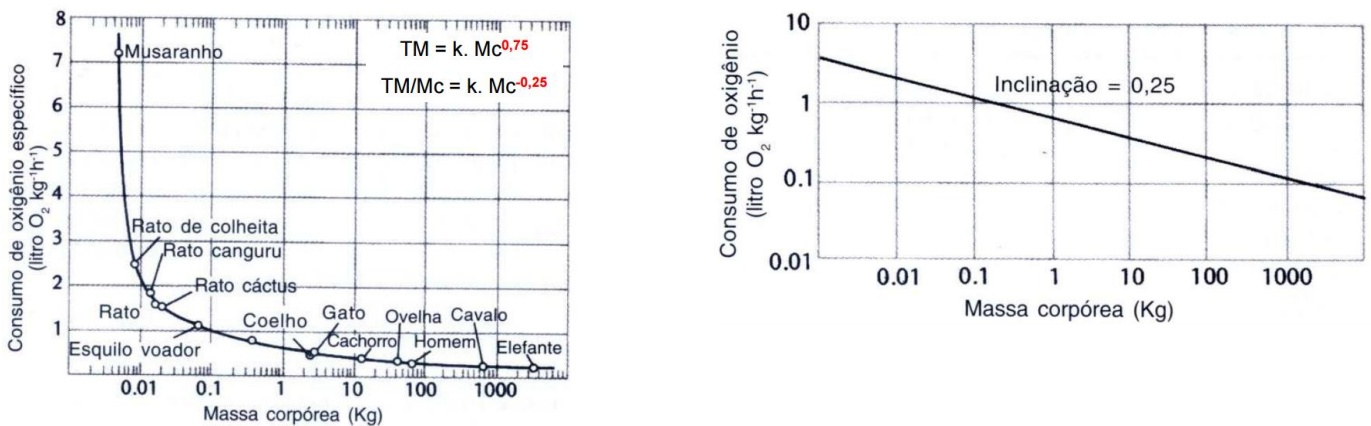


Figura 6. Taxas de consumo de oxigênio de vários mamíferos (SHIMIDT-NIELSEN, 2002).

### **3.5 Transferência de Calor e Massa**

#### **3.5.1 Conceitos Básicos**

Transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço (INCROPERA, 2012), podendo esta transferência de calor ocorrer por meio de condução, convecção e radiação.

Transferência de massa é devido ao trânsito de um fluido como o resultado de uma diferença de concentração de uma espécie em uma mistura. Portanto, da mesma forma que um gradiente de temperatura é o potencial motriz para a transferência de calor, um gradiente de concentração de uma espécie em uma mistura fornece o potencial motriz para o transporte desta espécie (INCROPERA, 2012).

A transferência de calor por convecção envolve dois mecanismos um de movimento molecular aleatório (difusão), e o outro a transferência de calor ocorre por meio de um movimento global no qual um grande número de moléculas está se movendo coletivamente ou como agregado (INCROPERA, 2012).

Ao passo que a contribuição pelo movimento molecular aleatório, é dominante próximo a superfície em baixas velocidades de fluido. A contribuição do movimento global do fluido origina – se da maneira que a espessura da camada- limite aumenta na relação que o escoamento progride ao longo da superfície na direção desse mesmo escoamento (ANTONIETTI et al., 2010).

#### **3.5.2 Camada Limite Térmica e de Concentração**

O conhecimento da camada limite e, por conseguinte os coeficientes de convecção são essenciais para o entendimento do processo de convecção de calor e de massa entre a superfície e o fluido de escoamento em contato com esta superfície (INCROPERA, 2012).

Nesses casos em que o fluido permite troca de matéria e de calor, são formadas além das camadas hidrodinâmicas camadas limites massivas ( $\delta_m$ ) e a camada limite de temperatura ( $\delta_t$ ) (MOREIRA, 2010).

Um exemplo de transferência de massa é dado por Incropera (2012), para representar a camada limite de concentração é dado pelo ar que se movimenta ao longo da superfície de uma porção de água, a água líquida irá evaporar e o vapor d'água será transferido para dentro da corrente de ar

A espessura das camadas limites de temperatura e massiva são dadas pela diferença de temperatura e a concentração massiva entre o soluto e a interface representem 99% da diferença das camadas na corrente livre do fluido e a interface (CREMASCO, 2008).

As camadas limites podem assumir comportamentos laminares ou turbulentos devido a sua velocidade de arraste do fluido, sendo que estes irão determinar o atrito superficial e as taxas de transferência de por convecção.

Na camada limite laminar o movimento do fluido é altamente ordenado, sendo possível identificar linhas de corrente ao longo das quais se movimentam as partículas de fluido. Já as camadas limites turbulentas são em geral irregulares sendo descritos pelo seu movimento tridimensional aleatório de relativamente grandes parcelas do fluido (INCROPERA, 2012).

Uns dos desafios da convecção é a determinação do coeficiente de convecção,  $h_c$  que pode ser determinado por maneiras empíricas, porém pode sofrer certa variação pois além de depender de várias propriedades do fluido, os coeficientes são funções da geometria da superfície e das condições do escoamento, que pode ser laminar ou turbulento (ANTONIETTE et al., 2011).

Número adimensionais de Nusselt (Nu), Reynolds (Re), Prandtl (Pr) e Schmidt (Sc) são responsáveis por incorporar os coeficientes suas características particulares já mencionadas.

Há três maneiras de aumentar a força dos termos da equação das fontes de calor ou convecção e, conseqüentemente, melhorar a transferência de calor: a primeira é aumentando o número de Reynolds e/ou o número de Prandtl ou com o aumento da plenitude da velocidade adimensional e/ou perfis de temperatura e

ainda com o aumento do ângulo formado entre os vetores do gradiente de velocidade e temperatura (GUO et al., 1998).

Os coeficientes de transferência de calor e de massa são considerados similares quando apresentam condições de contorno semelhantes com algumas mudanças nos números adimensionais como demonstrado por Yeh (1974), no qual o número de Nusselt e Prandtl utilizados nas trocas de calor por convecção são substituídos pelos números de Sherewood e Schmidt respectivamente nas transferências de massa.

Para tubos circulares com fluxo laminar, temperatura parede do tubo ( $T_s$ ) constante, o número de Nusselt pode se apresentar da seguinte forma para transferência de calor segundo Leveque (1928):

$$Nu = 1,007(Pe)^{1/3} (2R/x)^{1/3} \quad \text{Para } 100 < Pe(2R/x) < 5000 \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

Onde:

Pe = número adimensional de Peclet ,  $Pe = PrRe$

Estudando transferência de calor e massa no sistema respiratório de humanos, Hanna (1983) trabalhou com um coeficiente de calor baseado em um logaritmo de temperatura média ( $h_m$ ) no qual o número de Nusselt era representado por:

$$Nu = (wC_p / \pi Dk) \times \ln\{(T_o - T_{bi}) / (T_o - T_{bf})\} \quad (6)$$

Onde:

w = fluxo massivo ( $g \text{ s}^{-1}$ )

$C_p$  = calor específico ( $cal \text{ g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

D = distância da entrada de ar (m)

K = condutividade térmica do ar ( $W \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

$T_o$  = temperatura da parede da superfície respiratória ( $^\circ\text{C}$ )

$T_{bi}$  = temperatura inicial do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{bf}$  = temperatura final do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )

É de conhecimento que o número adimensional de Nusselt aumenta à medida que os números de Reynold e de Prandtl aumentam, e isso ocorre pelo aumento dos perfis de velocidade e temperatura do fluido (GUO et al., 1998).

Esta relação pode ser demonstrada com a equação desenvolvida a partir da equação original de Dittus e Boelter, para aquecimento de fluidos (WINTERTON, 1997):

$$Nu = 0,0243 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (7)$$

No escoamento da camada limite com o  $Pr < 1$ , a plenitude do perfil de velocidade é maior do que para os casos de  $Pr > 1$ , pois o limite térmica camada é mais espessa do que a camada limite de escoamento, como mostra a figura 7 (GUO et al., 1997).

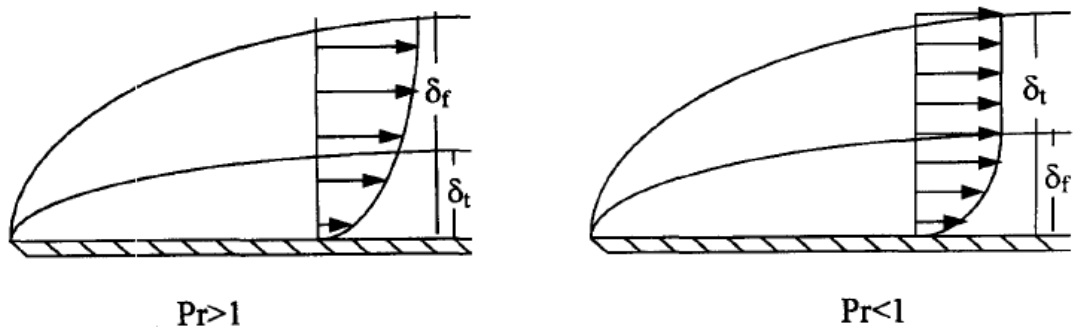


Figura 7 – Perfil de velocidade ( $\delta_f$ ) e de temperatura ( $\delta_t$ ) na camada limite com Prandtl ( $Pr$ )  $> 1$  e  $Pr < 1$ . (GOU et al., 1997).

### 3.5.3 Escoamento Interno

Ao se trabalhar com escoamento interno tem – se que observar as condições das regiões de entrada e das regiões de escoamento plenamente desenvolvidos.

Segundo Incropera (2012), a condição dinâmica para um fluido se tornar plenamente desenvolvida é aquela onde a velocidade torna – se constantes no interior de um tubo. Porém em condições plenamente desenvolvidas de temperatura se houver transferência de calor a temperatura varia em qualquer comprimento do tubo.

### **3.6 Transferência de calor e massa no trato respiratório**

O ar atmosférico ao entrar nas vias respiratórias é exposto aos fluidos que cobrem as superfícies respiratórias e com isso antes de o ar chegar aos alvéolos, torna-se totalmente umidificado e com uma temperatura próxima à temperatura corporal, pelo fato do ar ser aquecido pelas paredes das estruturas de condução do sistema respiratório (SILVA, 2000).

O processo inverso ocorre na expiração, pois as superfícies do trecho superior do trato respiratório anteriormente resfriadas por evaporação e convecção no momento da inspiração faz com que durante a expiração o ar sai da região alveolar com a temperatura corporal e seja resfriado por essas superfícies do trato respiratório fazendo com que a umidade ali se condense, com isso o ar expirado sai nas vias respiratórias superiores a uma temperatura menor que a dos pulmões e saturado a esta temperatura (SILVA, 2000).

As trocas de calor e massa pelo trato respiratório são uns dos mecanismos eficientes utilizados como forma de defesa contra a hipertermia ocorrendo por meio de evaporação respiratória principalmente, porém uma pequena perda ocorre através de calor sensível por meio de convecção (HOFMAN e RIEGLE, 1977).

As trocas de calor e massa no aparelho respiratório dão – se de forma que durante a inspiração, o vapor de água se difunde na passagem pelas vias aéreas a partir da camada limite na parede da traqueia para o núcleo mais rápido de movimento de ar no centro da corrente e é substituído por evaporação da umidade presente na parede da mucosa do trato respiratório. Durante a expiração, o vapor difunde-se a partir do centro para a camada limite e é condensado na parede. Além disso, uma vez que o ar expirado é diferente do ar ambiente em concentrações de

oxigênio e dióxido de carbono, difusão transversal destes componentes também ocorre (COLLINS et al., 1971).

A perda de calor e massa pode ser considerada um fenômeno passivo dependendo também da geometria das vias aéreas superiores e mais diretamente da temperatura e umidade do ambiente (MURRISH, 1973).

Segundo Daviskas et al. (1990), ocorrem maiores perdas de calor e massa quando ocorrem respirações simultâneas pelo nariz e pela boca, como nos casos de hiperventilação e durante exercícios físico. Porém, em animais como os equinos esta hiperventilação ocorre apenas pelo aumento da área onde ocorre a passagem de ar, ou seja, dilatação das narinas (NIELSEN, 2002).

Cain et al. (1990), demonstraram em um experimento com humanos que o ar inspirado entra no aparelho respiratório com temperaturas próximos a temperatura ambiente e tende a aumentar ligeiramente com inspirações sucessivas. Porém é demonstrado por Stevens (1981) que o ar entra com a temperatura ambiente e chega aos pulmões com a temperatura das paredes dos mesmos.

Estudos feitos com múltiplas respirações mostraram que perda de vapor de água por cada litro de gás ventilado não é em função da ventilação, por si só, e sim uma função direta com o aumento do volume corrente e que à medida que a frequência respiratória diminui ocorre uma diminuição da perda de massa de água (FERRUS et al., 1980).

Porém, Ray et al. (1989), avaliando distribuição longitudinal das trocas de calor e massa no trato respiratório de cães traqueostomizados, evidenciou uma relação das perdas de calor com o aumento da ventilação respiratória (volume-minuto), no qual que em respirações normais a perda de calor nas vias aéreas superiores foi substancialmente maior, já nas áreas de brônquios e bronquíolos foram simultaneamente bem menores. Entretanto quando ocorre um aumento da ventilação respiratória a distribuição axial das perdas de calor e vapor de água se altera aumentando desproporcionalmente essas trocas nas aéreas de brônquios e bronquíolos em relação às vias aéreas superiores.

Estudos feitos com girafas e outros animais silvestres no leste da África mostraram que a troca de calor que ocorre nas vias aéreas é dependente a área que

esta apresenta disponível para as trocas e também da distância entre o centro da massa de ar e as superfícies das vias aéreas (LANGMAN et al., 1979)

Avaliando as trocas de calor e massa em pinguins, Murrish (1973) constatou que em ambiente com temperatura de 5 °C o ar era aquecido pelas vias aéreas a uma taxa de 1,55 °C mm<sup>-1</sup> e com ambiente a uma temperatura de 20°C esta taxa cai para 0,06 °C mm<sup>-1</sup> de vias aéreas.

Estudo feito por Maia et al. (2005) demonstrou que as perdas de calor por evaporação e convecção do trato respiratório aumentam à medida que ocorrem um aumento da temperatura ambiental, no qual para vacas holandesas em ambientes acima de 25 °C as repostas a perdas de calor são significativas.

### **3.7 Modelagem em tecidos biológicos**

Em estudos de fenômenos biológicos, a modelagem matemática vem sendo bastante utilizada como ferramenta para solucionar problemas experimentais.

O uso de modelos matemáticos para representar os processos biológicos já é usado há muitos anos, sendo representado por modelos que apresentem uma parte do sistema ou de vários sistemas juntos, como descritos por Albuquerque-Neto (2010).

Um dos modelos para tecidos biológicos pioneiros para representar a interação térmica entre tecidos e a perfusão sanguínea é o modelo proposto por Pennes em 1948. Sendo este modelo denomina equação do Bio-calor referência para trabalhos de modelos térmicos em tecidos vivos.

Pennes (1948) propôs um modelo matemático para descrever os efeitos da geração metabólica de calor e da perfusão de sangue no balanço de energia dentro do tecido, incorporando estes efeitos na equação de condução de calor clássica.

### **3.8 Modelagem no Sistema Respiratório**

Segundo Albuquerque-Neto (2010), poucos modelos matemáticos integram o sistema respiratório e o sistema térmico, sendo essas fontes de estudos recentes.

O mesmo autor desenvolveu um modelo integrado dos sistemas térmicos e respiratório que permitia a determinação da distribuição da temperatura e das concentrações de oxigênio e dióxido de carbono ao longo do corpo, para isso foi trabalhado um modelo multicompartimental com diversos reservatórios de sangue (venoso e arterial) e gases ( $P_{CO_2}$  e  $P_{O_2}$ ) para os modelos de transporte de gases no pulmão.

Para modelagem da transferência de calor no trato respiratório, Albuquerque-Neto (2010) utilizou um modelo com sete compartimentos divididos durante a inspiração e expiração os trechos divididos foram, ambiente juntamente com os gases na boca/faringe, traqueia, primeiros brônquios até o fim do espaço morto e por ultimo o espaço alveolar, neste modelo o balanço de massa e de energia foi aplicado para a determinação da troca de calor e água em cada compartimento.

Hanna (1983), trabalhando com maquetes laboratoriais modelou a transferência de calor e massa no trato respiratório de maneira unidimensional em um processo dependente dos números adimensionais de Reynolds e Prandtl para transferência de calor e Reynolds e Schmidt para transferência de massa. Utilizando dos princípios fundamentais de conservação de massa, momentum e energia. Para desenvolvimento do modelo unidimensional estacionário, foi utilizada uma maquete de acrílico que representava o sistema respiratório, porém para os cálculos de transferência de calor e massa foram usados analogia Chilton-Colburn que utilizam de uma relação empírica entre transporte de calor e massa. Ocasionalmente algumas restrições ao modelo de Hanna.

Collins et al. (1971) desenvolvendo um modelo estacionário de transferência de calor e massa no trato respiratório de Kangaroo rat, incluindo o fluxo sanguíneo que passa pelas vias aéreas conseguiu prever a temperatura do ar expirado e também desses animais em recuperar umidade no trato respiratório, porém o modelo não levava em consideração a temperatura da superfície das paredes das vias respiratórias.

Outro modelo desenvolvido para avaliar a dinâmica da desidratação e a recuperação de umidade pelas vias respiratórias, porém realizado em humanos, foi desenvolvido por Tsu et al. (1988) um modelo unidimensional utilizando análise de volume de controle, pois segundo os autores esta análise apresenta algumas

vantagens pois conhecimentos de alguns detalhes sobre a velocidade do fluxo não são necessárias, geometrias complicadas são mais facilmente tratadas, expressões semi-empíricas para as taxas de calor e transporte de massa podem ser usados, e mais detalhes podem sempre ser incorporados em sucessivas versões do modelo. Ao se comparar as temperaturas de ar expirado e ar inspirado mensuradas em humanos adultos foram encontradas diferenças entre as temperaturas preditas pelo modelo, fato esse atribuído ao tempo de resposta do termossensor.

Utilizando volumes de controle e análise de diferenças finitas, Ingenito et al. (1986), desenvolveram um modelo de transferência de calor na respiração, neste modelo foi utilizada uma simplificação da construção física das vias aéreas e mucosa, isto para diminuir a complexidade computacional, utilizando a condução de calor e água pelo tecido da mucosa do trato respiratório, padrões da corrente de ar e geometria das vias aéreas. Mostrando uma aproximação muito grande com os valores de temperatura do ar expirado e no fim da inspiração coletados experimentalmente.

Ao contrário dos modelos descritos acima Cole e Scott (1977), desenvolveram um modelo para transferência de calor no trato respiratório de frangos, que apresentava uma temperatura do tubo traqueal constante, porém com uma velocidade variando com o tempo. Os autores acreditavam que devido as grandes contribuições para trocas de calor seriam por evaporação e a variação da temperatura na parede do tubo ser de apenas alguns graus Celsius, adotar uma parede com temperatura constante não traria muitos problemas ao modelo e facilitaria o cálculo matemático.

Modelo de transferência de calor na traqueia e nos sacos aéreos de aves domésticas foram desenvolvidos com uso de dinâmica de fluidos computacional (CFD) no intuito de investigar as condições de fronteira para o resfriamento por convecções e evaporação desses órgãos presentes no sistema respiratório (SVERDLOVA et al., 2012).

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Local**

O trabalho foi desenvolvido em quatro experimentos distintos realizados na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, campus Jaboticabal – SP, no Laboratório de Biometeorologia Animal (21°08' S, 48°11' W, 583 m altitude) nos experimentos com Nelore e Anglo Nubiana, na Agência Paulista Tecnológica (Apta) Ribeirão Preto, SP (21°10' S, 47°48' W, 546 m altitude) no experimento com Jersey e na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, campus Ilha Solteira – SP (20° 25' S, 51°20' W, 379 m altitude) no experimento com Guzerá.

### **4.2 Experimentos de Espirometria**

Para o estudo da espirometria foram realizados quatro experimentos, com duas espécies diferentes, sendo elas: caprinos da raça Anglo-nubiana e bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey, seguindo os princípios éticos na experimentação animal, adotado pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA) e foi aprovado pela Comissão de Ética no Uso de Animais (CEUA) com o protocolo nº 17519/14.

Os experimentos foram feitos em épocas e locais distintas e com as particularidades necessárias para cada espécie. Os mesmos são descritos separadamente nos itens abaixo.

#### **4.2.1 Experimento Bovinos de Corte da raça Nelore**

Foram utilizados cinco bovinos não castrados da raça Nelore (*bos taurus indicus*) com média de peso vivo de 743,4±15,8 kg e idade média de 30 meses.

O experimento foi realizado durante os meses de Fevereiro e Março no ano de 2013 no laboratório de Biometeorologia Animal na UNESP campus Jaboticabal.

Os animais eram alimentados no período da manhã e tarde com silagem de milho e concentrado.

Foi utilizado um delineamento em quatro quadrados latino (5x5), no qual cinco animais eram avaliados durante cinco dias em cinco classes de horários (Classe de hora 1: 08h00min- 10h00min; Classe de hora 2: 10h00min-12h00min; Classe de hora 3: 12h00min – 14h00min; Classe de hora 4: 14h00min – 16h00min; Classe de hora 5: 16h00min – 18h00min).

Ao final do experimento, foram realizados 20 dias de registros de dados resultando em 200 horas de observação de registros contínuos em intervalos de um segundo, gerando uma base de dados para cada variável dependente igual a 720.000 (setecentos e vinte mil observações). Esses registros contínuos foram acumulados em intervalos de tempo de 60 segundos e suas médias calculadas, reduzindo a base de dados para 12.000 linhas de observações.

Os dados foram submetidos a análise de variância, baseado no método dos quadrados mínimos (Harvey, 1960). Utilizou-se o programa “Statistical Analysis System” (SAS) de acordo com Littell e Freund (1991) para composição do arquivo, exame de distribuição de frequência dos dados, estatística descritiva e análise de variância. O modelo estatístico utilizado foi:

$$Y_{ijklmn} = \mu + A_i + Q_j + D_k(Q_j) + H_l + F_m(H_l) + T_n + e_{ijklmn}$$

Sendo:  $Y_{ijklmn}$  é a n-ésima observação das variáveis estudadas;  $A$  é o efeito aleatório do i-ésimo animal;  $Q$  efeito fixo do j-ésimo quadrado latino ( $i = 1, 2, 3, 4$ );  $D$  é o efeito fixo do k-ésimo dia de coleta dentro do i-ésimo quadrado latino;  $H$  é o efeito fixo da l-ésima classe de hora de coleta (Classe de hora 1: 08h00min- 10h00min; Classe de hora 2: 10h00min-12h00min; Classe de hora 3: 12h00min – 14h00min; Classe de hora 4: 14h00min – 16h00min; Classe de hora 5: 16h00min – 18h00min);  $F$  é o efeito fixo do m-ésimo minuto de coleta dentro da l-ésima classe de hora,  $T$  é o efeito fixo da n-ésima classe de temperatura,  $\mu$  é a média paramétrica e  $e_{ijklmno}$  é o erro aleatório.

#### **4.2.2 Experimento Caprinos**

Foram utilizadas nove fêmeas adultas não lactantes da raça Anglo – Nubiana (*capra ciprois*) com média de peso vivo de  $61,67 \pm 3,4$  kg. O experimento foi realizado durante o mês de novembro no ano de 2013 no laboratório de Biometeorologia Animal na UNESP campus Jaboticabal. Os animais eram alimentados no período da manhã e tarde com silagem de milho e ração.

O delineamento experimental utilizado foi de um quadrado latino (9x9), no qual nove animais foram avaliados por nove dias em nove classes de hora (Classe hora 1: 08h00min – 09h00min; Classe de hora 2: 09h00min – 10h00min; classe de hora 3: 10h00min – 11h00min; classe de hora 4: 11h00min – 12h00min; Classe de hora 5: 12h00min – 13h00min; Classe de hora 6: 13h00min – 14h00min; Classe de hora 7: 14h00min – 15h00min; Classe de hora 8: 15h00min – 16h00min; Classe de hora 9: 16h00min – 17h00min).

Ao final do experimento, foram realizados nove dias de coletas de dados resultando em 81 horas de observação de forma contínua em intervalos de um segundo, gerando uma base de dados para cada variável igual a 291.600 observações. Esses registros foram acumulados em intervalos de tempo de 60 segundos e suas médias foram calculadas, reduzindo a base de dados para para 4.860 linhas de observações.

Os dados foram submetidos à análise de variância, baseado no método dos quadrados mínimos (Harvey, 1960). Utilizou-se o programa “Statistical Analysis System” (SAS) de acordo com Littell e Freund (1991) para composição do arquivo, exame de distribuição de frequência dos dados, estatística descritiva e análise de variância. O modelo estatístico utilizado foi:

$$Y_{ijklmn} = \mu + H_i + F_j(H_i) + P_k + A_i(P_k) + D_m + T_n + e_{ijklmn}$$

Sendo:  $Y_{ijklmn}$  é a n-ésima observação das variáveis estudadas; H é o efeito fixo da i-ésima classe de hora de coleta (Classe hora 1: 08h00min – 09h00min; Classe de hora 2: 09h00min – 10h00min; classe de hora 3: 10h00min – 11h00min; classe de hora 4: 11h00min – 12h00min; Classe de hora 5: 12h00min – 13h00min; Classe de hora 6: 13h00min – 14h00min; Classe de hora 7: 14h00min – 15h00min;

Classe de hora 8: 15h00min – 16h00min; Classe de hora 9: 17h00min – 18h00min); F é o efeito fixo do j-ésimo minuto de coleta dentro da i-ésima classe de hora, P é o efeito fixo da k-ésima classe de peso, A é o efeito aleatório do l-ésimo animal dentro da k-ésima classe de peso, D é o efeito fixo do j-ésimo dia de coleta; T é o efeito fixo da n-ésima classe de temperatura do ar;  $\mu$  é a média paramétrica e  $e_{ijklmo}$  é o erro aleatório.

#### **4.2.3 Experimento Bovinos de Leite**

Foram utilizadas 12 vacas lactantes da raça Jersey (*bos taurus taurus*) do rebanho da APTA de Ribeirão Preto com peso médio de 362,1±9,3 kg em um experimento realizado durante o mês de Setembro de 2014 na própria APTA em Ribeirão Preto-SP. Os animais receberam a mesma dieta (proporção de volumoso: concentrado), sendo as dietas convencionalmente utilizadas na APTA de Ribeirão Preto.

Foi adotado um planejamento experimental em quadrado latino (12x12), composto por 12 animais avaliados durante 12 dias de coleta e observados durante 12 horas contínuas, divididas em 12 intervalos regulares de uma hora cada (Classe hora 1: 08h00min – 09h00min; Classe de hora 2: 09h00min – 10h00min; classe de hora 3: 10h00min – 11h00min; classe de hora 4: 11h00min – 12h00min; Classe de hora 5: 12h00min – 13h00min; Classe de hora 6: 13h00min – 14h00min; Classe de hora 7: 14h00min – 15h00min; Classe de hora 8: 15h00min – 16h00min; Classe de hora 9: 16h00min – 17h00min; Classe de hora 10: 17h00min – 18h00min; Classe de hora 11: 18h00min – 19h00min; Classe de hora 12: 19h00min – 20h00min).

Ao final do experimento foram realizados 12 dias de coletas de dados, resultando em 144 horas de observação contínuas, em intervalos de um segundo, gerando uma base de dados para cada variável dependente igual a 518.400 observações. Esses registros foram acumulados em intervalos de tempo de 60 segundos e suas médias calculadas, reduzindo a base de dados para 8.636 linhas de observações. Os dados foram analisados com auxílio do programa “Statistical Analysis System” (SAS) de acordo com Littell e Freund (1991). Esse programa foi utilizado para organização dos arquivos, exame de distribuição dos dados com

relação à normalidade, medidas de tendência central e dispersão, de associação e análise de variância, sendo está baseada no método dos quadrados mínimos (Harvey, 1960). A análise de variância foi realizada utilizando o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijkLm} = \mu + D_i + A_j + H_k + F_l(H_k) + T_m + e_{ijkLm}$$

Sendo:  $Y_{ijkLm}$  é a m-ésima observação das variáveis estudadas; D é o efeito aleatório do i-ésimo dia de coleta; A é o efeito aleatório do j-ésimo animal ( $j=1, \dots, 12$ ); H é o efeito da k-ésima classe de hora de coleta (Classe hora 1: 08h00min – 09h00min; Classe de hora 2: 09h00min – 10h00min; classe de hora 3: 10h00min – 11h00min; classe de hora 4: 11h00min – 12h00min; Classe de hora 5: 12h00min – 13h00min; Classe de hora 6: 13h00min – 14h00min; Classe de hora 7: 14h00min – 15h00min; Classe de hora 8: 15h00min – 16h00min; Classe de hora 9: 16h00min – 17h00min; Classe de hora 10: 17h00min – 18h00min; Classe de hora 11: 18h00min – 19h00min; Classe de hora 12: 19h00min – 20h00min).; F é o efeito fixo do l-ésimo minuto de coleta dentro da k-ésima classe de hora; T é o efeito da m-ésima classe de temperatura do ar ( $m = 23, \dots, 35$ ),  $\mu$  é a média paramétrica e  $e_{ijkLm}$  é o erro aleatório.

#### **4.2.4 Experimento Bovinos de Corte - Guzerá**

Foram utilizados 10 bovinos (cinco machos e cinco fêmeas) de um lote de 18 animais mochos da raça Guzerá (*bos taurus indicus*) do plantel da Fazenda de Ensino Pesquisa e Extensão (FEPE) da UNESP de Ilha Solteira - SP, com idade média de 10 meses de idade e peso corporal com média de  $420 \pm 15,3$  kg. Os animais foram alojados em baias individuais e alimentados com a mesma dieta, proporção volumoso:concentrado de 30:70, com base na matéria seca

Foi adotando um planejamento experimental em quadrado latino (10x10), composto por 10 animais avaliados durante 10 dias de coleta e observados durante 10 horas contínuas dividida em 10 intervalos regulares de uma hora cada. As coletas foram realizadas com os animais manejados a sombra, sendo o primeiro

animal avaliado entre as 08:00 e 09:00h; o segundo animal no período de 09:00 as 10:00h, e assim sucessivamente até o décimo animal que foi avaliado no período de 17:00 as 18:00h.

Ao final do experimento foram realizados 10 dias de coleta de dados resultando em 100 horas de observações de registro contínuos em intervalos de um segundo, gerando uma base de dados para cada variável dependente (por exemplo, a frequência respiratória) igual a 360.000 (setecentos e vinte mil observações). Esses registros contínuos foram acumulados em intervalos de tempo de 60 segundos (um minuto) e suas médias foram calculadas, conseqüentemente a base de dados se reduziu para 6000 linhas de observações.

Esses dados foram analisados estatisticamente com auxílio do programa “Statistical Analysis System” (SAS) de acordo com Littell e Freund (1991). Esse programa foi utilizado para organização dos arquivos, exame de distribuição dos dados com relação à normalidade, estatísticas de tendência central, de dispersão, de associação e análise de variância, sendo baseada no método dos quadrados mínimos (Harvey, 1960).

O modelo estatístico utilizado para o experimento foi:

$$Y_{ijklmn} = S_i + A_j(S_i) + D_k + H_l + F_m(H_l) + T_n + e_{ijklmn}$$

sendo:  $Y_{ijklmn}$  é a n-ésima observação das variáveis estudadas; S é o efeito fixo do i-ésimo sexo (i=macho ou fêmea); A é o efeito aleatório do j-ésimo animal (j=1,...,10) dentro do i-ésimo sexo (i=macho e j=1,...,5; i=fêmea e j=6,...,10); D é o efeito aleatório do k-ésimo dia de coleta (k= 1,...,10); H é o efeito da l-ésima classe de hora de coleta (k=classe hora 1: 08h00min – 09h00min; classe de hora 2: 09h00min – 10h00min; classe de hora 3: 10h00min – 11h00min; classe de hora 4: 11h00min – 12h00min; classe de hora 5: 12h00min – 13h00min; classe de hora 6: 13h00min – 14h00min; classe de hora 7: 14h00min – 15h00min; classe de hora 8: 15h00min – 16h00min; classe de hora 9: 16h00min – 17h00min; classe de hora 10: 17h00min – 18h00min); F é o efeito fixo do m-ésimo minuto de coleta dentro da l-ésima classe de hora; T é o efeito da n-ésima classe de temperatura do ar (m = 23,...,35);  $\mu$  é a media paramétrica e  $e_{ijklmn}$  é o erro aleatório.

### **4.3 Medidas Fisiológicas**

Durante todos os experimentos, foi utilizado o Sistema de Medidas Fisiológicas (SMF), desenvolvido pelo Núcleo de Inovação em Biometeorologia Animal (INO BIO) do Laboratório de Bioclimatologia da FCAV – UNESP (Fig. 8), utilizado para mensuração do vapor de água proveniente do ar expirado, mensurações das funções respiratórias (frequência respiratória, fluxo respiratório e volume respiratório corrente), trocas gasosas ( volume de O<sub>2</sub> consumido, volume de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> produzido) além das temperaturas retal e do ar expirado

#### **4.3.1 Descrição do Sistema de Medidas Fisiológicas (SMF)**

1. Máscara facial (Desenvolvidas pelo próprio laboratório de Bioclimatologia, específica para cada espécie):
2. Analisador de O<sub>2</sub> (modelo FMS-1201-05, Field Metabolic System);
3. Analisador de CO<sub>2</sub> (modelo FMS-1201-05, Field Metabolic System);
4. Dois analisadores de vapor de H<sub>2</sub>O (modelo RH-300, Sable System);
5. Duas bombas (modelo SS4 sub-sample, Sable System);
6. Uma coluna de dissecante (Perclorato de Magnésio);
7. Um espirômetro (modelo ML141 da ADInstruments);
8. Uma câmara misturadora de gases (modelo MLA246, ADInstruments);
9. Dois tubos de respiração (MLA1015 Breating Tube, ADInstruments);
10. Um cabeçal de fluxo (modelo MLT1000, ADInstruments);
11. Um sensor de temperatura nasal (modelo MLT415/AL, ADInstruments);
12. Um sensor de temperatura retal (Modelo MLT1407, ADInstruments);
13. Sistema de aquisição de dados (Modelo PowerLab 16/30 e LabChart Pro, ADInstruments);
14. Terminal para termistores (Modelo Thermistor Pod ML309, ADInstruments);
15. Computador.

#### **4.3.2 Funcionamento do Sistema de Medidas Fisiológicas (SMF)**

As Figuras 8, 9 e 10 mostram o esquema de funcionamento do SMF durante o experimento. Para o SMF realizar as medidas da frequência respiratória ( $F_R$ , resp  $\text{min}^{-1}$ ), da ventilação ( $V_E$ ,  $\text{L s}^{-1}$ ), porcentagem de  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_{2E}$ , %) e  $\text{O}_2$  ( $\text{O}_{2E}$ , %) expirados nos animais durante os experimentos, primeiramente, a máscara facial foi ajustada ao focinho dos animais de forma que a cada movimento respiratório, o ar da atmosfera entrasse pela válvula de entrada de ar da máscara, enquanto o ar expirado saísse pela válvula de saída de ar. Um tubo de respiração foi conectado na válvula de saída da máscara até a entrada de ar da câmara misturadora, assim conduzindo o ar expirado do animal até esta câmara de gases. Na saída de ar da câmara misturadora foi conectada uma mangueira plástica (BEV-A-LINE IV) e com o auxílio de uma bomba, uma amostra de ar expirado no interior da câmara misturadora, foi aspirado e puxado através da mangueira plástica para o tubo de dessecante (Perclorato de magnésio -  $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ ) para retirar as moléculas de vapor de  $\text{H}_2\text{O}$  para então seguir para os analisadores de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  que farão a leitura da proporção desses gases no ar expirado do animal ( $\text{CO}_{2E}$  e  $\text{O}_{2E}$  respectivamente).

Para o SMF realizar as medidas da frequência respiratória ( $F_R$ , resp  $\text{min}^{-1}$ ), do volume respiratório corrente ( $V_{RC}$ ,  $\text{L resp}^{-1}$ ) e do fluxo respiratório ( $V_E$ ,  $\text{L s}^{-1}$ ) no conduto de saída de ar na câmara do misturador de gases foi conectado um cabeçal de fluxo, específico para cada espécie animal (MLT-300L para ovinos; MLT1000L para caprinos; MLT 1000L para bovinos, por onde o ar expirado do animal, após passar pela câmara misturadora de gases, passe pelo interior do cabeçal de fluxo que está conectado ao espirômetro que realizou a leitura digital da  $F_R$ ,  $V_{RC}$  e  $V_E$ .

No SMF as leituras do *baseline* das proporções de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  da atmosfera ( $\text{O}_{2A}$ ,  $\text{CO}_{2A}$  e  $\text{CH}_{4\text{ATM}}$ , respectivamente) serão feitas sempre que a máscara facial for retirada do focinho do animal. O *baseline* para a pressão parcial de vapor da atmosfera ( $P_{P\{T_A\}}$ , kPa) será feita utilizando um analisador de  $\text{H}_2\text{O}$  (analisador 2) conectado por uma mangueira plástica a uma bomba (bomba 2) que puxará continuamente o ar ambiente para dentro desse analisador. Diferentemente da concentração de  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}_2$  na atmosfera, o conteúdo de vapor nela varia acentuadamente ao longo do dia, por isso a necessidade de um analisador de vapor de  $\text{H}_2\text{O}$  exclusivo para o *baseline* da pressão de vapor de  $\text{H}_2\text{O}$  na atmosfera.

Todas as leituras realizadas pelo SMF foram registradas continuamente e simultaneamente, a uma taxa de uma observação por segundo pelo sistema de aquisição de dados, o qual foi conectado a um notebook que armazenou todos os dados para posterior extração dos mesmos. A partir desses dados foi possível estudar a termorregulação dos animais, através da produção de calor metabólico, perda de calor por evaporação na respiração perda de calor por convecção no aparelho respiratório, volume respiratório corrente e o padrão respiratório de cada animal.

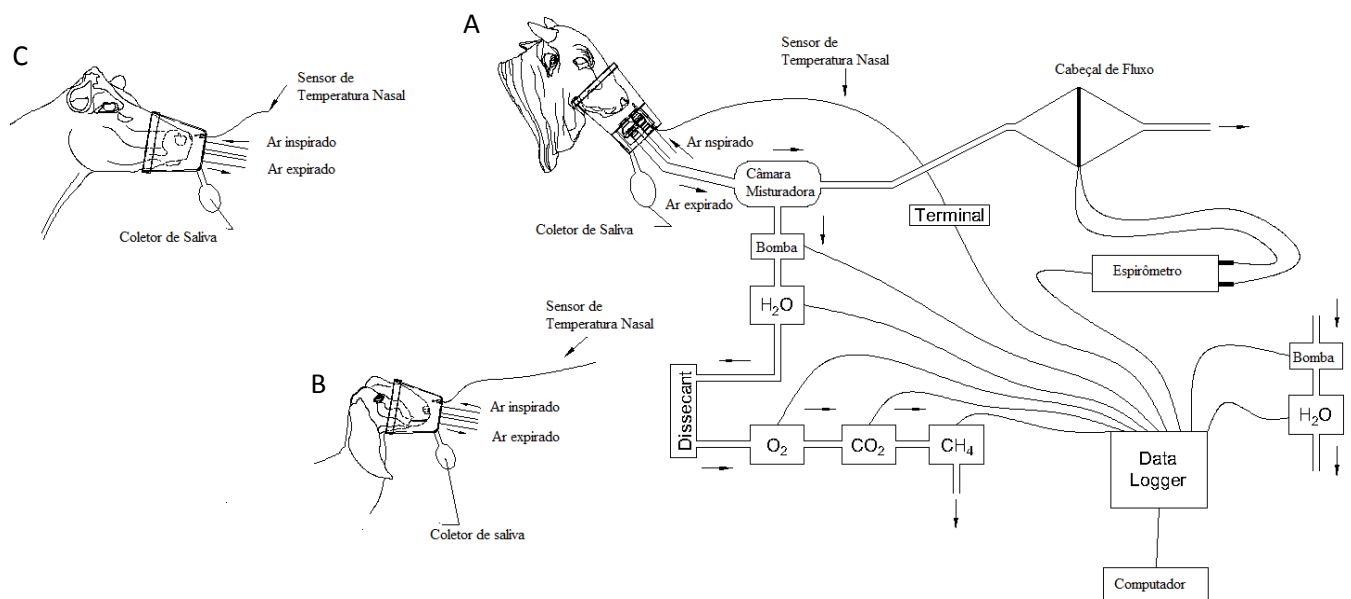


Figura 8. Representação esquemática do Sistema de Medidas Fisiológicas do Laboratório de Biometeorologia Animal em bovinos de corte (A), caprinos (B) e bovinos de leite (C).

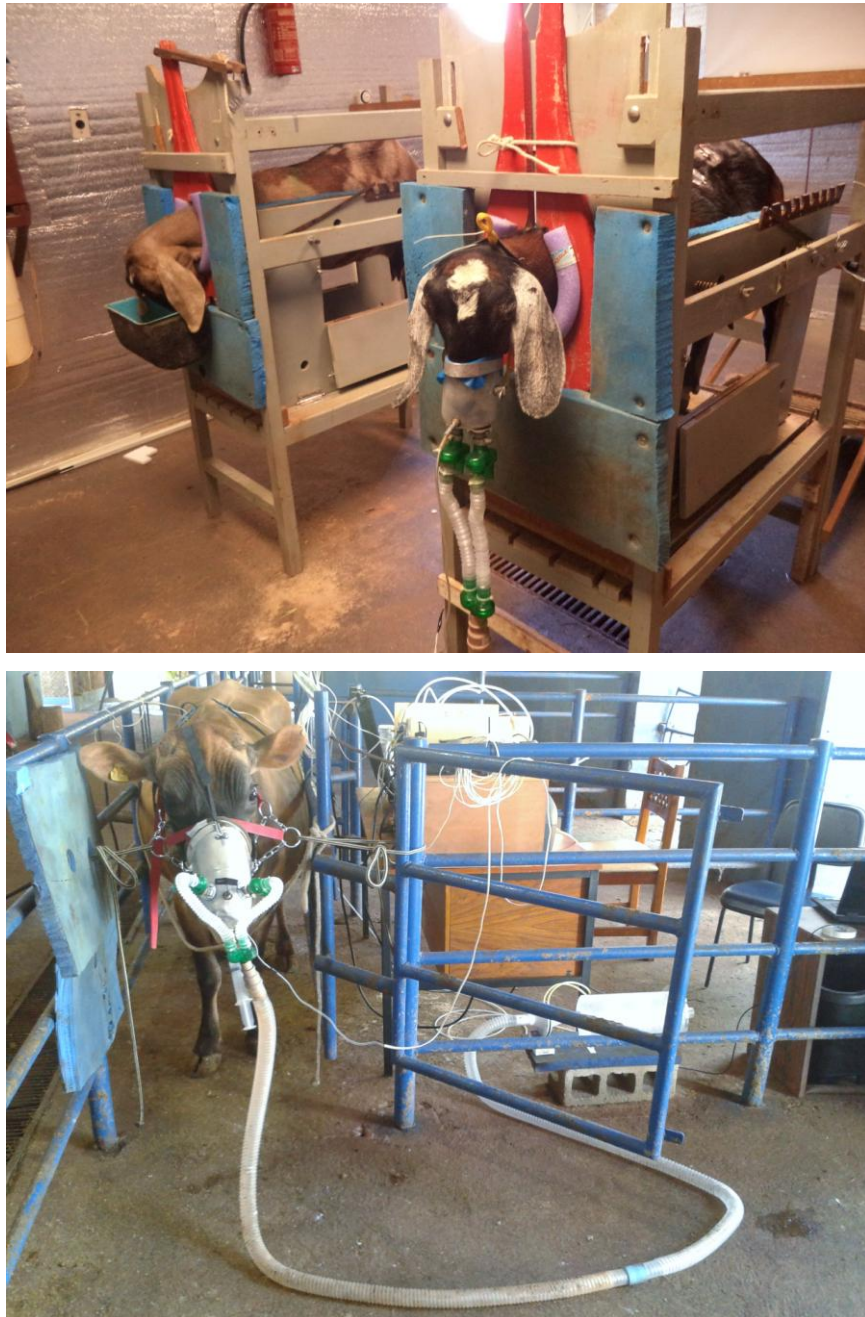


Figura 9. Animais durante as coletas de dados com Sistema de medidas fisiológicas do Laboratório de Biometeorologia Animal. (foto: próprio autor)



Figura 10. Animal usando a máscara facial do Sistema de medidas fisiológicas do Laboratório de Biometeorologia Animal. (foto: próprio autor)

#### 4.4 Dados Meteorológicos

Os dados de temperatura do ar ( $t_A$ , °C) e umidade relativa do ar (UR, %) foram coletados através do uso de um data logger (modelo HOBO, onset), programado para realizar medidas a cada um segundo. Já a radiação solar direta foi medida com um Piranômetro (modelo CMP 22, Kipp & Zonen), em intervalos regulares de dez minutos.

A temperatura radiante média ( $T_{RM}$ , K) foi estimada a partir dos dados de temperatura do ar, velocidade do vento e temperatura de um globo negro (esfera oca de chapa de cobre com 0,15 m de diâmetro e pintada de preto fosco), a qual foi medida com um sensor (Termopar tipo K) inserido no centro do globo, o sensor era conectado a um datalogger registrador de dados (modelo HOBO, onset). A  $T_{RM}$  foi estimada utilizando a equação proposta por Silva (2000),

$$T_{RM} = \left[ \frac{h_G(T_G - T_A) + \varepsilon_G \sigma T_G^4}{\varepsilon_G \sigma} \right]^{\frac{1}{4}}$$

No qual:

$\varepsilon_G = 0,95$  é a emissividade do globo negro,  $T_G$  (K) é a temperatura do globo negro,  $\sigma = 5,67051 \times 10^{-8}$  (W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>) é a constante de Stefan-Boltzman e  $h_G$  (W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>) é o coeficiente de convecção do globo negro que foi obtido de acordo com a seguinte equação de acordo com Silva and Maia (2013):

$$h_G = kd^{-1}Nu$$

No qual:

$k$  é a condutividade térmica do ar (W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>),  $d$  é a dimensão característica do corpo (m) e  $Nu$  é o número adimensional de Nusselt, calculado de acordo com Silva e Maia (2013)

#### **4.5 Adaptação dos animais ao uso da máscara facial**

No estudo de calorimetria indireta utilizada no Sistema de Medidas Fisiológicas (SMF) é fundamental o condicionamento dos animais ao uso da máscara facial (Fig. 11), por meio do condicionamento operante (SKINNER, 1989) antes da execução do período de coleta de dados. Neste caso, foi utilizado o concentrado como reforço positivo.

##### **4.5.1 Condicionamento dos Animais**

Esse condicionamento foi realizado durante quatro meses em duas fases distintas:

A primeira fase os animais gradualmente foram submetidos à rotina de coleta similar as condições experimentais. Nesta fase fora divididas em quatro semanas de

condicionamento, no qual a primeira semana os animais foram submetidos ao uso da máscara facial durante o período de 15 minutos, na segunda semana foi aumentado o tempo de permanência com a máscara para 30 minutos, na terceira semana 45 minutos e 60 minutos na quarta semana.

Na segunda fase do condicionamento, foram avaliados se os animais estavam aptos a integrar o experimento mediante a contagem da frequência respiratória ( $F_R$ , resp  $\text{min}^{-1}$ ), através dos movimentos do flanco do animal, ou seja, era mensurada a frequência respiratória antes do uso da máscara e reavaliada imediatamente após ajustar a máscara ao focinho do animal. A partir deste instante a frequência respiratória era avaliada em intervalos de tempo regulares de dez minutos até completar uma hora de uso da máscara.



Figura 11. Animais durante o condicionamento da máscara (foto: Leandro Z. Camerro)

## **2.6 Calibrações do Sistema de espirometria**

A calibração do espirômetro foi feita anteriormente a cada início do experimento essa calibração é necessária para que a leitura seja feita em termos de fluxo ( $L \cdot s^{-1}$ ) e não em volts. Uma calibração para os valores de fluxo lidos pelo espiromêtro e o verdadeiro volume que passa através de cada cabeçal de fluxo fossem confirmados era feita diariamente antes de se iniciar as mensurações nos animais.

As calibrações eram feitas de duas maneiras: automática no próprio software Labchart Pro® e manualmente para ambas as calibrações.

#### ***4.6.1 Calibração Automática***

A calibração automática foi feita utilizando a própria calibração do software Labchart Pro® específica para cada cabeçal de fluxo usando um fator de correção já especificado no programa.

#### ***4.6.2 Calibração Manual – Utilização da seringa de 3 litros***

A calibração manual era feita através da injeção de um volume conhecido de ar que passava pelo sistema de espirometria e após isso era integrado o sinal de fluxo ao Labchart-Pro®.

Para o experimento com caprinos foi utilizada a seringa de 3 litros (Hans Hudolf Kansas, EUA), porém com um volume fixo de 500 mL que corresponde ao valor aproximando do volume desses animais, este volume era injetado pelo sistema de espirometria com ciclo de cinco injeções de ar que eram semelhantes a uma respiração. Após esse processo, a curva desses volumes era selecionada e este volume indicado ao software como o volume correto.

Para o experimento com bovinos foi feito o mesmo procedimento porém com um volume de 3 litros da seringa.

#### **4.6.3 Confirmação da calibração através do Saco de Douglas – com a seringa**

Uma última confirmação da calibração, feita anteriormente ao início do experimento, era feita no laboratório com a utilização de um Saco de Douglas que é definido como um saco de material no qual o gás não consegue escapar do mesmo.

Para isto acoplava-se um Saco de Douglas de 200 litros a parte final do misturador de ar, ou seja, no local onde o ar expirado saia para o ambiente. O tempo de permanência do saco de Douglas era de um minuto. Após isso o saco era retirado e imediatamente vedado.

Com auxílio da seringa de três litros retirava-se o volume de ar retido no saco de Douglas e assim fazia-se a conferência com o valor do volume de ar lido pelo espirômetro sendo admitido um erro de 5% de diferença entre os volumes lidos pelo espirômetro e o retirado do saco de Douglas.

Para a confirmação de que o saco de Douglas estivesse vazio ao se iniciar a calibração era feita uma pesagem do mesmo antes de colocar no misturador de ar, e outra após finalizar a coleta do animal, com um volume de ar expirado dentro do saco, e também após a retirada do ar pela seringa, sendo que o peso do saco deveria ser igual ou muito próximo ao peso antes de se colocar no animal, assim confirmando seu total esvaziamento.

#### **4.7 Leitura dos dados no Labchart-Pro®**

A leitura dos dados do Labchart-Pro® para serem analisados no programa estatístico era realizada de maneira que eram selecionados apenas trechos do arquivo em que as ondas representavam a respiração do animal.

Ondas que representavam alguma interferência externa, como por exemplo, um movimento de cabeça do animal, não foram selecionadas.

Anteriormente a extração dos dados era realizada uma “limpeza” do sinal no arquivo para que os “ruídos” fossem retirados dos mesmos e a extração ficasse mais precisa.

Após a extração os dados eram organizados em segundos e levados para o Excel e assim analisados no programa estatístico SAS.

#### 4.8 Consumo de O<sub>2</sub> e Produção de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>

Os volumes de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> (L h<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup>) foram calculados de acordo com McLean, (1972) usando a correção de Haldane para condições de temperatura e pressão padrão considerando o ar seco (0 °C ou 273.15 K, 101,325 kPa e 0 umidade),

$$VO_2 = V_{E(STPD)} \left[ O_{2A} \left( \frac{1 - O_{2A} - CO_{2A} - CH_{4A}}{1 - O_{2E} - CO_{2E} - CH_{4E}} \right) - O_{2E} \right] \quad (9)$$

$$VCO_2 = V_{E(STPD)} \left[ CO_{2E} - CO_{2A} \left( \frac{1 - O_{2A} - CO_{2A} - CH_{4A}}{1 - O_{2E} - CO_{2E} - CH_{4E}} \right) \right] \quad (10)$$

$$VCH_4 = V_{E(STPD)} \left[ CH_{4E} - CH_{4A} \left( \frac{1 - O_{2A} - CO_{2A} - CH_{4A}}{1 - O_{2E} - CO_{2E} - CH_{4E}} \right) \right] \quad (11)$$

sendo,

$$V_{E(STPD)} = V_E \frac{P_{atm} - P_{exp}}{T_{exp} + 273,15} \left( \frac{273,15}{101,325} \right) \quad (12)$$

#### 4.9 Produção de calor metabólico

A produção de calor metabólico ( $q''_{met}$ , W m<sup>-2</sup>) foi calculada de acordo com da Silva e Maia (2013), adaptado de Brouwer (1965) e McLean (1972):

$$q_{met} = \frac{16180VO_2 + 5160VCO_2 - 2420VCH_4}{A_n} \quad (13)$$

Onde:  $A_n$  ( $m^2$ ) é a área de superfície animal, estimada de acordo com Bennett (1973):

$$A_n = 0.15B_w^{0.5556} \quad (14)$$

Sendo  $B_w$  é o peso corporal do animal (kg).

#### 4.10 Cálculos perdas de calor no trato respiratório

O fluxo de calor latente no processo respiratório foi calculado pelo produto da taxa de ventilação pulmonar e pela diferença no conteúdo de umidade do ar expirado com aquela do ar inspirado (Maia et al., 2005). Então este resultado foi multiplicado pelo calor latente que foi dividido pela área de superfície corporal, permitindo a estimativa do fluxo de calor latente respiratório ( $q_{ER}$ ,  $W m^{-2}$ ):

$$q_{ER} = \frac{\lambda V_{RC} F_R (\Psi_E - \Psi_A)}{A} \quad (15)$$

No qual  $A$  ( $m^2$ ) é a área de superfície corporal,  $\lambda$  é o calor latente de vaporização ( $J g^{-1}$ ) e  $\Psi_A$  ( $g m^{-3}$ ) umidade absoluta da atmosfera:

$$\Psi_A = \frac{2166,87P_P\{T_A\}}{T_A} \quad (16)$$

em que  $P_P\{T_A\}$  é a pressão parcial de vapor da temperatura do ar (kPa),  $T_A$  (K) é a temperatura do ar e  $\Psi_E$  ( $g m^{-3}$ ) a umidade absoluta do ar expirado:

$$\Psi_E = \frac{2166,87P_S\{T_{EXP}\}}{T_{EXP}} \quad (17)$$

em que  $P_S\{T_{EXP}\}$  (kPa) é a pressão de saturação de vapor do ar expirado e  $T_{exp}$  (K) é a temperatura do ar expirado.

O fluxo de calor sensível, ou seja, perda de calor por convecção respiratória ( $q''_{CR}$ ,  $W m^{-2}$ ) foi calculada a partir da equação (da Silva e Maia, 2013):

$$q''_{CR} = \frac{V_{RC} F_R c_p \rho (T_{EXP} - T_A)}{A} \quad (18)$$

No qual  $V_{RC}$  é o volume respiratório corrente ( $L \text{ resp}^{-1}$ );  $F_R$  é a frequência respiratória ( $\text{resp min}^{-1}$ );  $c_p$  é o calor específico do ar ( $J g^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ );  $\rho$  é a densidade do ar ( $kg m^3$ );  $T_{EXP}$  é a temperatura do ar expirado ( $^\circ C$ );  $T_A$  é a temperatura do ar ( $^\circ C$ ) e  $A$  é a área superfície corporal ( $m^2$ ).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho mensurou simultaneamente a produção de calor metabólico, ventilação pulmonar, volume respiratório corrente, volume produzido de  $CO_2$  e  $CH_4$  e volume consumido de  $O_2$ .

### 5.1. Variáveis Ambientais

A média da temperatura do ar foi de  $30,7 \pm 0,04$ ;  $30,0 \pm 0,04$  e  $26,8 \pm 0,07$  e  $29,0 \pm 0,03^\circ C$  e a média da umidade relativa foi de  $64,7 \pm 0,1$ ,  $61,2 \pm 0,1$ ;  $73,1 \pm 0,2$  e  $36,8 \pm 0,1\%$  (Tabela 1), nos experimentos realizados com bovinos de corte Guzerá e Nelore, Cabras Anglo-nubiana e vacas leiteiras Jersey, respectivamente. A temperatura radiante média ( $T_{RM}$ ) e conseqüentemente a temperatura do globo ( $T_G$ ) não tiveram grande diferença em relação à temperatura do ar ( $T_A$ ), isso pelo fato das medidas terem sido feitas à sombra, ou seja, protegidas da radiação solar direta. Nos experimentos dos bovinos de corte Nelore e Guzerá e nas vacas Jersey a

radiação solar direta medida alcançaram médias de 655, 530,73 e 514,2 W m<sup>-2</sup>, respectivamente. Porém, no ambiente dos caprinos não foi mensurada a radiação solar, pois os mesmos foram avaliados em ambiente fechado, sendo assim sem influencia da radiação direta.

Tabela 1. Média, valores mínimos e máximos da temperatura do ar ( $T_A$ , °C), pressão de vapor ( $P_V$ , kPa), umidade relativa ( $U_r$ , %) , temperatura radiante média ( $T_{RM}$ , °C) e radiação solar ( $R_s$ ,  $W m^{-2}$ ) observada durante os experimentos.

Variáveis	Espécies/Raças															
	Gado de corte – Guzerá				Gado de corte – Nelore				Caprinos - Anglo Nubiana				Gado leiteiro - Jersey			
	n	média	max	Min	n	Media	max	min	n	média	max	min	n	média	max	min
$T_A$	4200	30,7	36,4	23,2	5889	30,0	36,5	22,0	4744	26,8	30,8	22,7	8637	29,0	34,3	19,5
$P_v$	4178	2,1	2,8	1,5	5509	2,6	3,2	1,9	4556	2,7	3,4	2,0	7439	1,1	2,6	0,2
$U_r$	4200	64,7	90,3	45,1	5300	61,3	85,4	39,9	4832	73,1	82,3	54,5	8640	36,8	79,8	16,6
$T_{RM}$	3310	30,3	37,2	23,4	4948	31,1	38,7	21,2	4744	26,7	30,5	22,6	8637	29,2	34,9	19,7
$R_s$	1371	655,0	1170	52	11310	530,7	1050	24	-	-	-	-	6250	514,2	907	20

n = número de observações; - = sem observação;

A variação diária da  $T_A$  e da  $U_R$  avaliada entre 08:00 e 17:00 h para o experimento com os caprinos foi de apenas  $1,6^\circ\text{C}$  e  $2,0\%$ , respectivamente, já nos experimentos com bovinos Nelore e Guzerá realizados no período de 08:00 e 18:00 h esta variação foi de  $6,6$  e  $5,9^\circ\text{C}$  para  $T_A$  e  $22,1$  e  $17,8\%$  para  $U_R$ , respectivamente, enquanto que no experimento com vacas leiteiras realizado no período de 08:00 às 20:00 observou-se uma variação maior de temperatura do ar ao longo do dia de  $9,1^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $25\%$  (Figura 12). Esta pequena variação observada no experimento com caprinos ocorreu devido ao fato das coletas terem sido feitas em um ambiente fechado.

A radiação solar foi medida nos experimentos feitos em ambiente aberto, porém protegidos da mesma e tiveram uma variação diária de aproximadamente  $700$ ,  $720$  e  $800 \text{ W m}^{-2}$  nos experimentos com Guzerá, Jersey, Nelore, respectivamente.

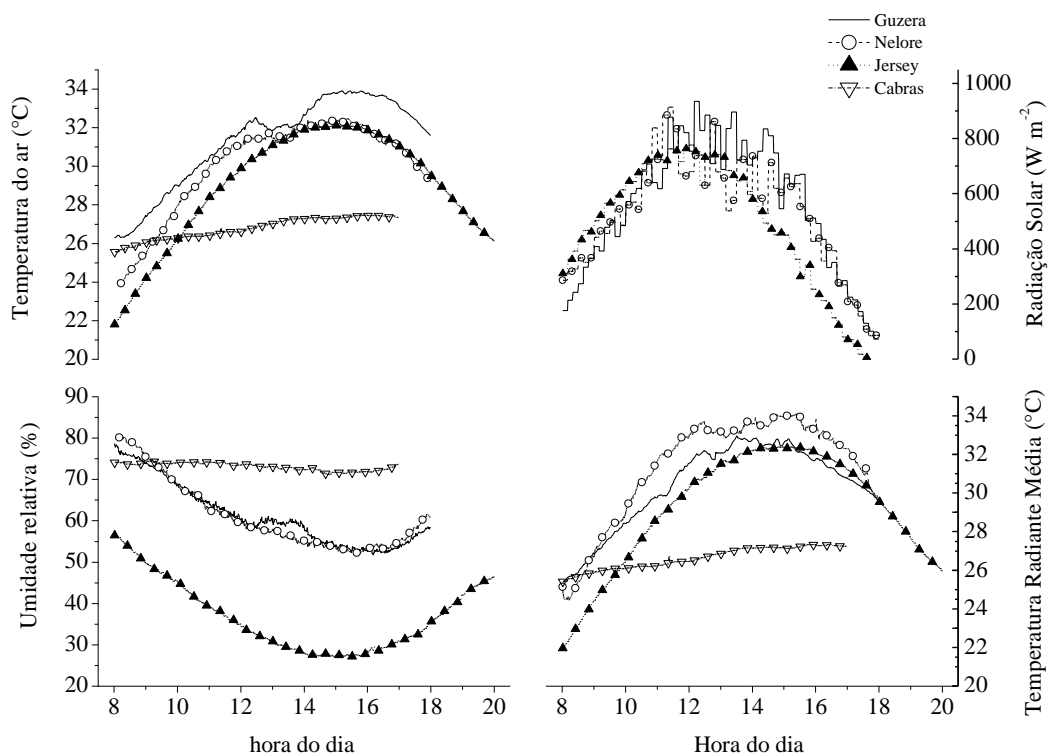


Figura 12. Média dos quadrados mínimos da temperatura do ar ( $T_A$ ,  $^\circ\text{C}$ ), umidade relativa ( $U_R$ , %), radiação solar ( $R_S$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ) e temperatura radiante média ( $T_{RM}$ ,  $^\circ\text{C}$ ) de acordo com as horas do dia (graus decimal) nos quatro experimentos.

## 5.2. Relação peso corporal e variáveis fisiológicas

Os valores médios e os erros-padrão obtidos nos quatro experimentos para peso corporal ( $B_W$ ), ventilação ( $V_E$ ), volume respiratório corrente ( $V_{RC}$ ), frequência respiratória ( $F_R$ ), volume de  $CO_2$  produzido ( $VCO_2$ ) e volume de  $O_2$  consumido ( $VO_2$ ) e produção de calor metabólico ( $q''_{met}$ ) foram descritos na tabela 2.

Os animais Nelore apresentaram um  $V_{RC}$ ,  $VO_2$  e  $VCO_2$  de 3,5 L resp<sup>-1</sup>, 140,6 e 164 L h<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup>, respectivamente, com uma frequência respiratória de 19 resp min<sup>-1</sup>. McManus et al. (2009) encontraram valores de 27 resp min<sup>-1</sup> na  $F_R$  de bovinos Nelore, sendo este, próximo aos encontrados nos animais Guzerá no presente estudo (média de 24 resp min<sup>-1</sup>). Segundo Kleinman e Radford (1964), animais de maior peso apresentam uma menor frequência respiratória, este fato fica evidenciado ao se analisar a  $F_R$  dos animais nelores, com média de peso corporal de 743 kg.

As vacas Jersey que tinham um peso médio de 362,17 kg apresentaram uma maior produção de calor metabólico, frequência respiratória e ventilação respiratória um dos motivos deve-se ao fato desses animais estarem em lactação.

As maiores  $F_R$  e  $V_E$  foram observadas nas vacas Jersey de 38 resp. min<sup>-1</sup> e 83,334 L min<sup>-1</sup>, respectivamente, conseqüentemente esses animais, entre os bovinos, apresentaram menor  $V_{RC}$  de 2,78 L resp<sup>-1</sup>. McDowell et al. (1953), ao avaliarem estresse por calor em vacas leiteiras Jersey e Shindi (Crossbreed), também encontraram valores similares de  $V_E$ ,  $V_{RC}$  e  $F_R$ ; 80,4 L min<sup>-1</sup>; 2,11 L resp<sup>-1</sup> e 42,6 resp min<sup>-1</sup> para animais Jersey de 449,51kg .

As cabras Anglo Nubianas apresentaram uma frequência respiratória de 22 resp min<sup>-1</sup> com um volume respiratório de 0,15 L s<sup>-1</sup> e  $V_{RC}$  de 0,4 L resp<sup>-1</sup>. Valores abaixo do encontrado por Al-Tamini (2007) avaliando efeito de sombra em caprinos machos da raça Damascus com média de peso corporal de 37 ±1,7 kg que apresentaram uma  $F_R$  média de 47,7 resp min<sup>-1</sup>. Maia et al. (2015) também observaram uma frequência respiratória e ventilação em cabras SRD com valores médios de 40 resp min<sup>-1</sup> e 0,2 L s<sup>-1</sup>, respectivamente, porém estes dois estudos foram feitos em climas desérticos e semiárido com temperatura do ar por volta de

35,5 e 32,6 °C, respectivamente, enquanto no experimento feito com caprinos a temperatura do ar ficou com média de 26 °C.

Tabela 2. Média geral ( $\pm$  erro padrão), valores mínimos e máximos do peso corporal ( $B_W$ , kg), Ventilação ( $V_E$ , L  $s^{-1}$ ), frequência respiratória ( $F_R$ , resp.min $^{-2}$ ), volume respiratório corrente ( $V_{RC}$ , L.resp $^{-1}$ ), volume de  $O_2$  consumido ( $VO_2$ , L h $^{-1}$  animal $^{-1}$ ), volume de  $CO_2$  produzido ( $VCO_2$ , L h $^{-1}$  animal $^{-1}$ ), produção de calor metabólico ( $q''_{met}$ , W.m $^{-2}$ ) durante os experimentos.

Variáveis	Espécies/Raças															
	Gado de corte - Guzerá				Gado de corte – Nelore				Caprinos - Anglo Nubiana				Gado leiteiro – Jersey			
	n	média	Max	min	n	média	max	min	n	média	max	min	n	média	max	min
$B_W$	10	420 $\pm$ 15.3	496	353	5	743,4 $\pm$ 15.8	774	684	9	61,67 $\pm$ 3.4	79,4	52,2	12	362,1 $\pm$ 9.3	415	316
$V_E$	1418	1,03 $\pm$ 0,04	1,56	0,53	4109	1,09 $\pm$ 0,03	1,8	0,62	3073	0,15 $\pm$ 0,001	0,35	0,07	3796	1,39 $\pm$ 0,05	2,25	0,53
$F_R$	3743	24 $\pm$ 0,05	38	15	5562	19 $\pm$ 0,04	30	11	3683	22 $\pm$ 0,13	64	10	5162	38 $\pm$ 0,08	56	20
$V_{RC}$	1762	3,3 $\pm$ 0,01	5,7	1,4	4084	3,5 $\pm$ 0,01	8	1,51	3072	0,4 $\pm$ 0,001	0,8	0,2	4805	2,78 $\pm$ 0,01	5,5	1,3
$VO_2$	1308	60,3 $\pm$ 0,4	112,5	25,2	4136	140,6 $\pm$ 0,46	258,7	73,45	2593	13,9 $\pm$ 0,07	31,6	6,1	3054	514,2	209	53
$VCO_2$	1308	81,9 $\pm$ 0,5	140,2	32,8	4136	164 $\pm$ 0,58	324,5	90,8	2593	16,2 $\pm$ 0,07	36,6	7,5	3054	152,9 $\pm$ 0,64	267	58,2
$q_{met}$	1308	90,8 $\pm$ 0,5	158,4	40,5	4136	146,6 $\pm$ 0,48	268,3	76	2593	62,3 $\pm$ 0,28	147,7	30,4	3054	230,4 $\pm$ 0,85	384	98,2

n = número de observações

A relação entre peso corporal e ventilação apresentou um efeito quadrático com um  $R^2 = 0,96$  (figura 13). Mitchell et al. (1972), estudando a relação entre peso corporal e volume respiratório em diferentes animais, encontraram uma relação linear entre as duas variáveis, com um  $R^2$  de 0,99 para bovinos e 0,90 para ovinos. Esta diferença entre os efeitos encontrados no trabalho de Mitchell e do presente trabalho se deve ao fato que Mitchell avaliou animais com pesos entre 70 e 100 kg de peso de vivo e também que os animais Nelore, ou seja, de maior peso apresentarem uma menor frequência respiratória, conseqüentemente diminuindo sua ventilação respiratória fazendo o efeito quadrático na função. Os animais da raça Anglo-nubiana apresentaram média de ventilação de  $0,16 \text{ L s}^{-1}$ . Nos bovinos a média da ventilação foi de 1,37; 1,06; 1,14  $\text{L s}^{-1}$  para os e Jersey, Guzerás e Nelore, com media de peso de 362; 420; 743 kg, respectivamente.

$$V_E = -0,093 + 0,0055B_w - 5,25 \times 10^{-6} B_w^2$$

$$R^2 = 0,91$$

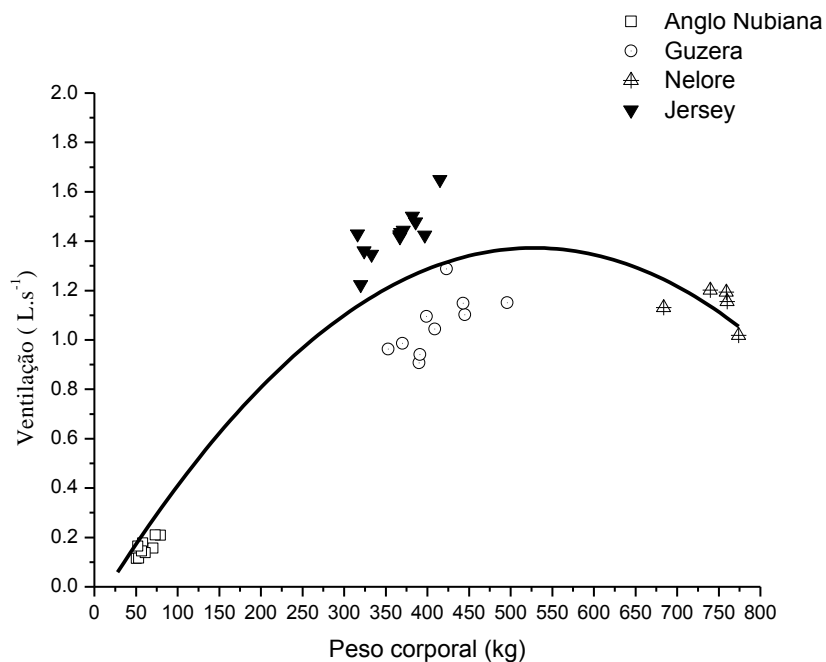


Figura 13. Ventilação ( $V_E, \text{L s}^{-1}$ ) em função do peso corporal ( $B_w, \text{kg}$ ) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.

Ao se analisar o volume respiratório corrente dos animais notou-se que há um aumento do  $V_{RC}$  à medida que aumenta o peso corporal desses animais (Figura 14). O mesmo efeito foi observado em estudos feitos com vacas leiteiras das raças Jersey, Holandesa e Pardo Suíço com médias de peso corporal de 376, 553, 608 kg e  $V_{RC}$  de 3.2, 4.1, 4.8 L resp<sup>-1</sup>, respectivamente (WORSTELL e BRODY,1953).

Mitchell et al. (1972), trabalhando com ruminantes com peso médio variando entre 50 e 100 kg (ovinos e bezerros) encontraram valores de  $V_{RC}$  menores. Este fato pode ser explicado devido aos animais do estudo em questão terem sido previamente anestesiados para realização das medidas. Maia et al. (2005), ao avaliar a perda de calor pelo trato respiratório em vacas holandesas adultas, observaram valores de  $V_{RC}$  próximos aos encontrados nos animais Guzerá e nas vacas Jersey, com média de 4 L.resp<sup>-1</sup> para animais de 558 kg de peso vivo.

$$V_T = 0.056 + 0.009B_w - 5.35 \times 10^{-6} B_w^2$$

$$R^2 = 0,95$$

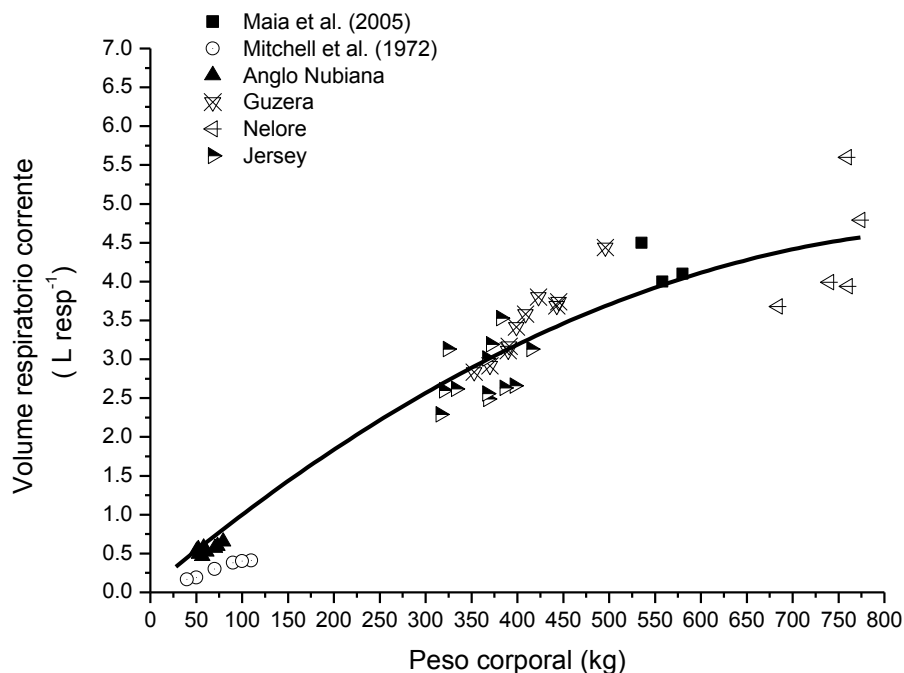


Figura 14. Volume respiratório corrente ( $V_{RC}$ , L resp<sup>-1</sup>) em função do peso corporal ( $B_w$ , kg) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.

Entretanto, analisando o  $V_{RC}$  por unidade de peso corporal (figura 15), ou seja, peso-específico nota-se que esta relação se inverte ao encontrado na tabela anterior. Isto devido ao fato de que animais de menor peso corporal ter um maior metabolismo. De acordo com Kleiber (1947) a taxa metabólica por unidade de peso apresenta uma correlação negativa com o peso corporal. A mesma correlação foi encontrada para frequência respiratória por unidade de peso corporal (figura 16) e conseqüentemente para a proporção de  $O_2$  por unidade de peso vivo (figura 17).

Esta disparidade revela que as necessidades metabólicas das espécies não são proporcionais ao seu tamanho corporal (HILL et al., 2012).

$$V_{RC} = -1,82B_w^2 - 3,19B_w + 0,009$$

$$R^2 = 0,47$$

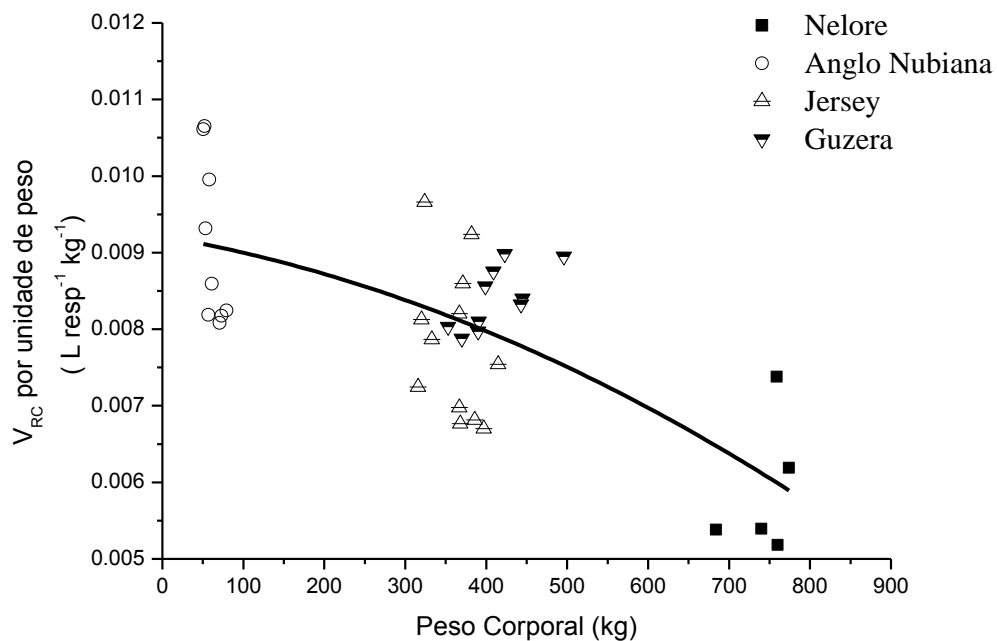


Figura 15. Volume respiratório corrente por unidade de peso corporal ( $V_{RCp}$ ,  $L \text{ resp}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ ) em relação ao peso corporal ( $B_W$ , kg) de bovinos das raças Nelore, Guzera e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana

Analisando a relação da frequência respiratória por unidade de peso ( $F_{Rp}$ ) com o peso corporal do animal observa-se uma função não linear, com um  $R^2 = 0,97$

como mostra a figura 16. Esta função demonstra uma correlação negativa entre  $F_{Rp}$  e peso corporal, portanto, animais com menor peso apresentam uma maior atividade respiratória (HOPPELER e WEIBEI, 2005).

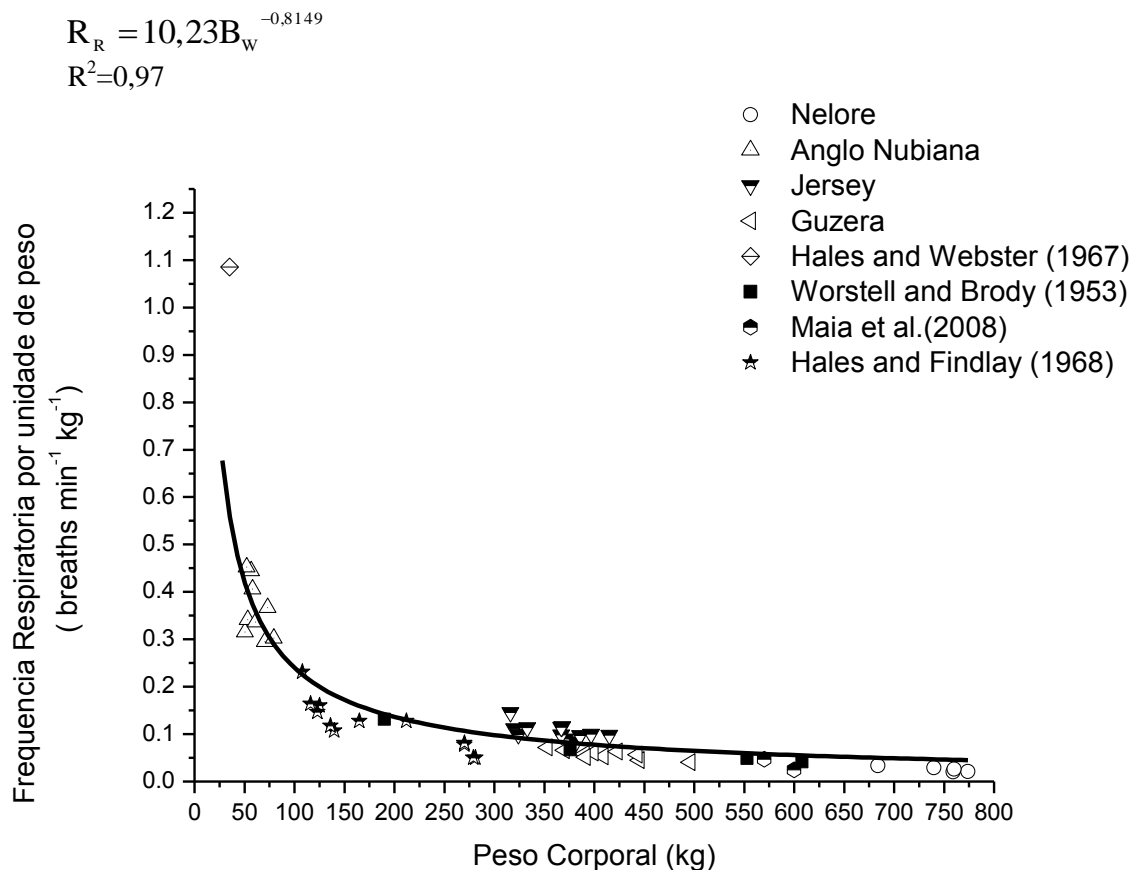


Figura 16. Frequência respiratória por unidade de peso corporal ( $F_{Rp}$ , resp  $\text{min}^{-1} \text{kg}^{-1}$ ) em relação ao peso corporal ( $B_w$ , kg) de bovinos das raças Nelore, Guzera e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.

Uma função inversa e não linear ( $R^2=0,99$ ) também foi encontrada ao se avaliar a porcentagem de  $O_2$  consumido por unidade de peso em função do peso corporal desses animais (figura 17). Nos animais com peso corporal entre 62 kg (caprinos) a porcentagem de oxigênio consumido foi de aproximadamente  $0,3\% \text{kg}^{-1}$  enquanto os animais com média de peso corporal de 743 kg (Nelore) tiveram uma porcentagem de  $0,05\% \text{kg}^{-1}$ . Esta variação representa um consumo de quase 10 vezes mais nos animais de menor peso. Zeuthen (1953), avaliando o consumo de

O<sub>2</sub> em função do peso corporal em diferentes espécies verificou um aumento do O<sub>2</sub> consumido e da produção de calor metabólico por unidade de peso quando o peso dos animais diminui.

$$\%O_2 = 23,95B_w^{-1,058}$$

$$R^2 = 0,99$$

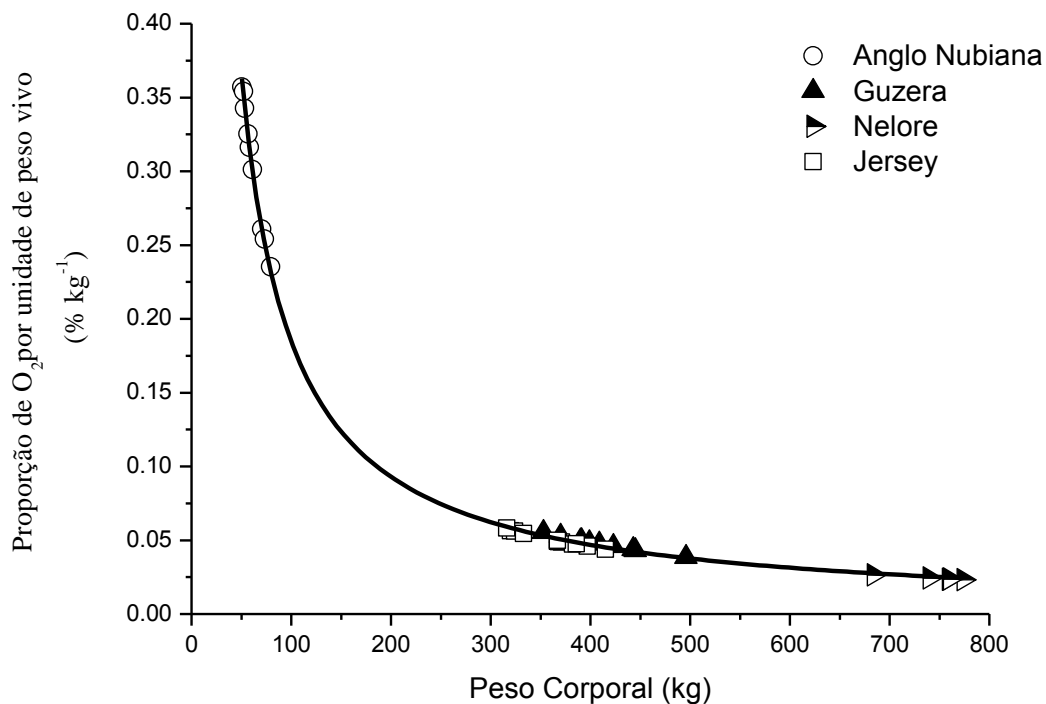


Figura 17. Proporção de O<sub>2</sub> expirado por unidade de peso corporal ( $P_pO_{2p}$ , % kg<sup>-1</sup>) em relação ao peso corporal ( $B_w$ , kg) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.

### 5.3. Influência da temperatura do ar nas funções respiratórias e trocas gasosas

Ao se analisar a ventilação em relação à temperatura do ar nota-se que a mesma apresenta um aumento nos animais Jersey e nas cabras Anglo Nubiana, porém nos bovinos de corte (Nelore e Guzerá) houve uma queda com o aumento da temperatura do ar (Figura 18). A elevação da ventilação está ligada a um aumento

da frequência respiratória que possui uma forte relação linear com esta variável (Brasil et al. 2000).

A relação entre ventilação ( $L s^{-1}$ ) e a frequência respiratória pode ser evidenciada no experimento realizado com caprinos, que apresentou um coeficiente de correlação entre essas variáveis de 0,88. Com o aumento da temperatura de 23 para 31°C os caprinos aumentaram a sua ventilação respiratória de 0,12 para 0,17  $L s^{-1}$  e sua frequência respiratória de 19 para 26 resp  $min^{-1}$  como mostram as figuras 20 e 22, respectivamente.

Brasil et al. (2000) estudando cabras alpinas estressadas artificialmente em câmaras climáticas verificaram que as mesmas aumentaram o seu volume respiratório de 0,315 para 0,366  $L s^{-1}$  quando a temperatura foi elevada de 22 para 33 °C, sendo também notado um aumento da frequência respiratória de 35 para 39 resp  $min^{-1}$  na mesma faixa de temperatura do ar.

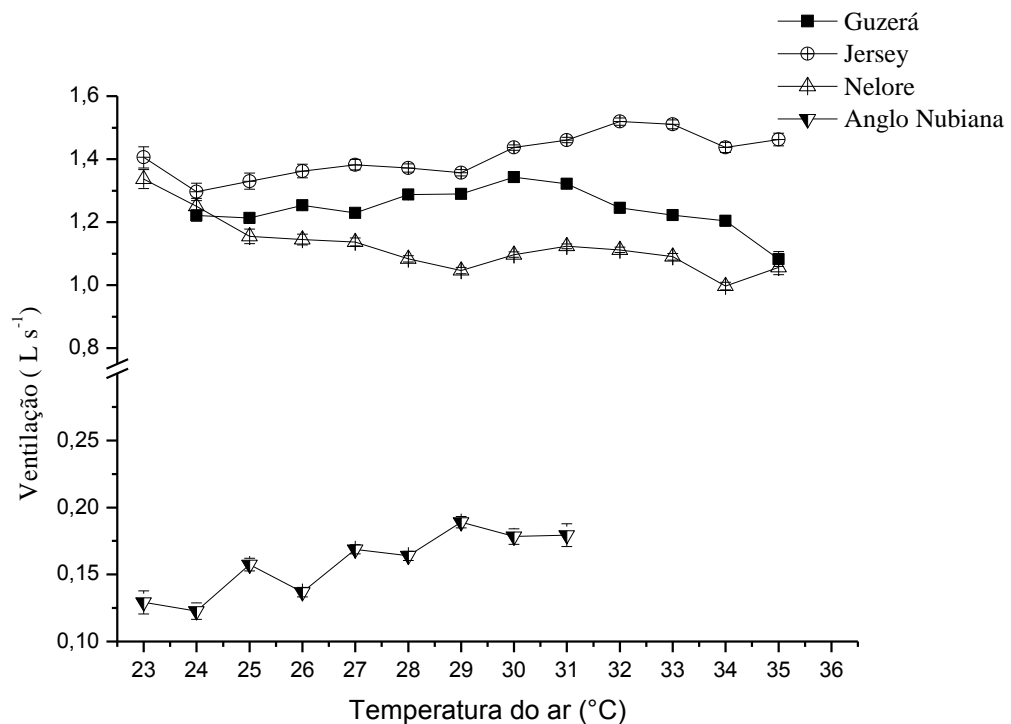


Figura 18. Ventilação respiratória ( $V_E$ ,  $L s^{-1}$ ) em função da temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.

Ao se analisar o volume respiratório corrente nota-se que o mesmo diminui com o aumento da temperatura do ar (Figura 19), isto devido a elevação da frequência respiratória, essas duas variáveis ( $V_{RC}$  e  $F_R$ ) apresentaram uma correlação negativa sendo que nos bovinos Nelore essa correlação foi maior (-0,65). Hales e Webster (1967) estudando o padrão respiratório de ovelhas da raça Merino encontraram respostas semelhantes, nas quais com aumento de temperatura do ar o  $V_{RC}$  diminuía à medida que a frequência respiratória e a ventilação aumentavam.

Estudo com touros da raça Ayrshire mostraram o mesmo comportamento, porém com uma intensidade maior, pois os animais diminuíram o seu volume respiratório corrente de 2,3 para 1,2 L resp<sup>-1</sup> e aumentaram a frequência de 19 para 111 resp min<sup>-1</sup> quando a temperatura variou de 14 para 30°C, respectivamente (HALES e FINDLAY, 1968). Os animais Nelore e Guzerá tiveram uma diminuição do  $V_{RC}$  pouco expressiva de 5,0 para 4,5 no Nelore e 4,75 para 3,75 L resp<sup>-1</sup> no Guzerá e um aumento na  $F_R$  de 18 para 20 no Nelore e 19 para 27 resp min<sup>-1</sup> no Guzerá, respectivamente quando a temperatura do ar variou de 23 para 35°C.

As vacas Jersey e também as cabras Anglo Nubiana tiveram uma pequena variação no volume respiratório corrente, praticamente não variando com o aumento da temperatura do ar. Heisey et al. (1971) trabalhando com cabras Anglo Nubiana observaram uma redução do  $V_{RC}$  de 0,291 para 0,217 L resp<sup>-1</sup> e um aumento da  $F_R$  de 29 para 100 resp min<sup>-1</sup> quando a temperatura do ar variou de 25 para 30°C respectivamente,  $T_A$  próxima a encontrada nos nossos estudos.

Uma possível causa para esta diferença em relação às cabras do presente experimento que mantiveram seu volume em 0,5 L resp<sup>-1</sup> e um aumento da  $F_R$  de 20 para 27 resp min<sup>-1</sup> é que as cabras do estudo feito por Heisey et al. (1971) foram mantidas em câmaras com ambiente controlado por um período de 120 minutos em cada temperatura (25 e 30°C) acentuando os efeitos da temperatura do ar sobre os animais. Já no presente trabalho os animais foram apenas protegidos da radiação solar, porém sem controlar as variações de temperatura do ar, fato este que pode ter amenizado as respostas fisiológicas dos animais à temperaturas do ar maiores de 25°C.

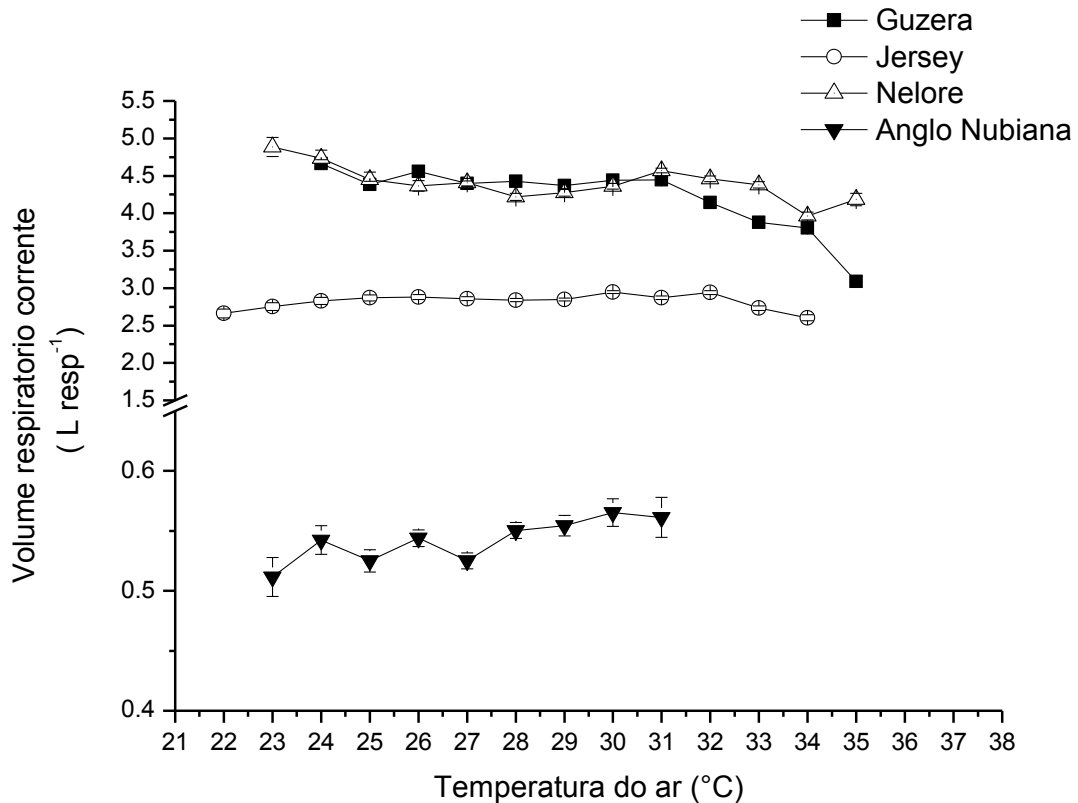


Figura 19. Volume respiratório corrente ( $V_{RC}$ , resp  $\text{min}^{-1}$ ) em função da temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.

Em relação à frequência respiratória nota-se que em todos os animais houve um aumento da frequência respiratória quando se aumentou a temperatura do ar (Figura 20). As correlações entre  $T_A$  e  $F_R$  foram positivas e apresentaram valores de 0,23; 0,35; 0,51 e 0,63 para animais Nelore, Jersey, Guzerá e Anglo Nubiana, respectivamente. Maia et al. (2008), analisando a perda de calor no trato respiratório de vacas holandesas em ambiente tropical, observaram um aumento de 41 resp  $\text{min}^{-1}$  quando a temperatura do ar variou de 12 para 35 °C. Contudo, nas vacas Jersey essa amplitude apresentou uma variação de 36 para 40 resp  $\text{min}^{-1}$  quando a temperatura variou de 22 para 35 °C (Figura 20).

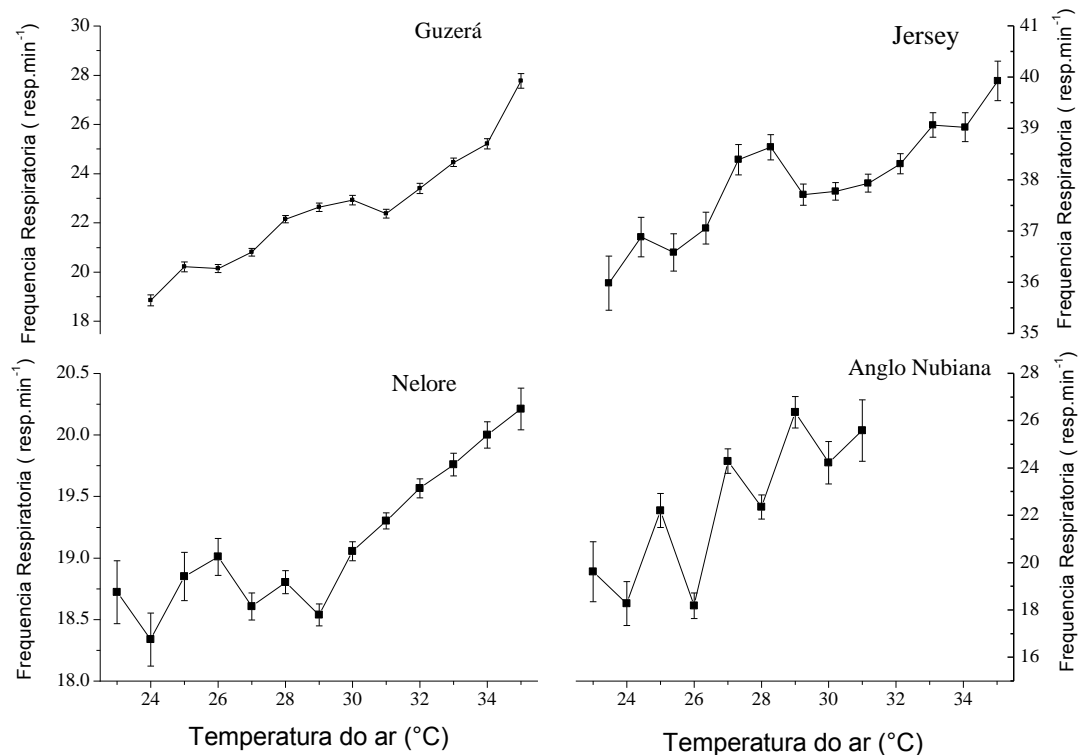


Figure 20. Frequência respiratória ( $F_R$ , resp min<sup>-1</sup>) em função da temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.

A figura 21 observa-se a relação dos volumes de  $O_2$  produzidos,  $CO_2$  e  $CH_4$  produzidos nas raças de bovinos de corte (Nelore e Guzerá), Jersey e cabras Anglo Nubianas em relação à temperatura do ar. Pode-se notar que em todos os animais não houve uma grande variação dos volumes consumido e produzido de  $O_2$  e  $CO_2$ , respectivamente, sendo que nos animais Nelore, Jersey e Anglo Nubiana ocorreu um pequeno aumento e já nos animais Guzerá houve uma pequena diminuição desses volumes.

Em relação ao volume de  $CH_4$  produzido pode-se notar na figura 21 que o mesmo diminui com o aumento da temperatura, pois levando em consideração que

nessa faixa de temperatura, ainda mais sem o efeito direto da radiação solar, o ambiente ruminal pode não ter sido alterado, principalmente com relação a temperatura interna do rúmen, sendo esta, a que mais influência no padrão de fermentação (GENGLER et al., 1970). Além disso, possivelmente nas temperaturas mais baixas, ou seja, na faixa entre 22 a 24 °C podem estar relacionados aos horários de manhã e final de tarde onde os animais eram alimentados, aumentando assim a emissão de metano entérico nesta faixa de temperatura.

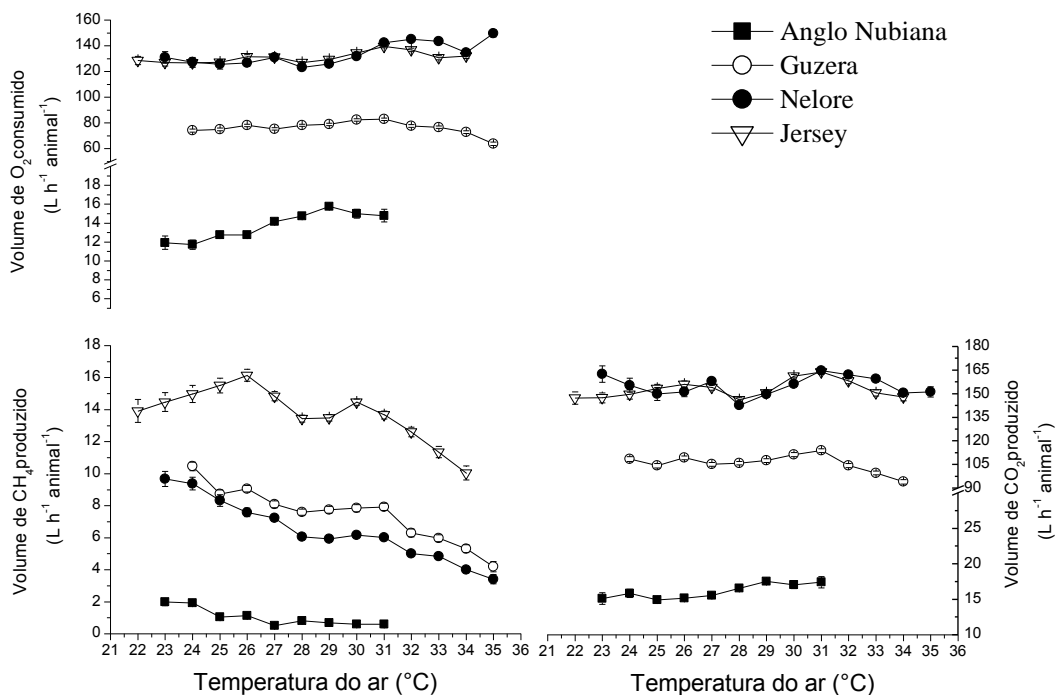


Figura 21. Volume de  $O_2$  produzido ( $VO_2$ , L h<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup>), volume de  $CO_2$  consumido ( $VCO_2$ , L h<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup>) e volume de  $CH_4$  consumido ( $VCH_4$ , L h<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup>) em relação à temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore, Guzera e Jersey e caprinos da raça Anglo Nubiana.

Ao se analisar a produção de calor metabólico em relação à temperatura do ar nota-se que esta também não apresentou uma grande variação (Figura 22), porém nota-se que com temperaturas superiores a 30°C os animais Jersey, Anglo Nubiana e Nelore aumentaram a  $F_R$ ,  $V_E$ ,  $VO_2$  e  $VCO_2$  e conseqüentemente a produção de calor metabólico. Maia et al. (2015) encontraram uma variação de 54

para  $65 \text{ W m}^{-2}$  em cabras SRD manejadas à sombra, valores próximos ao encontrado no presente estudo com as cabras Anglo Nubianas também protegidas da radiação solar. Finch et al.(1980) avaliando cabras Beduínas no deserto do Sinai observaram valores médios de produção de calor metabólico de  $82 \text{ W m}^{-2}$  quando a temperatura variava de 35 a 46 °C. Este mesmos autores afirmam que a pouca variação na produção de calor metabólico em relação à temperatura do ar é devido que os adicionais ganhos de calor são perdidos em processos evaporativos.

Diferentemente do que foi encontrado nas outras raças, o Guzerá com aumento de temperatura do ar tiveram uma queda na produção de calor metabólico, porém com um aumento na frequência respiratória com uma proporcional diminuição no  $V_{RC}$ , sem um compromisso em realizar as trocas gasosas, este processo segundo Robertshaw, (2006) pode ser considerado que estes animais estavam em início de ofegação.

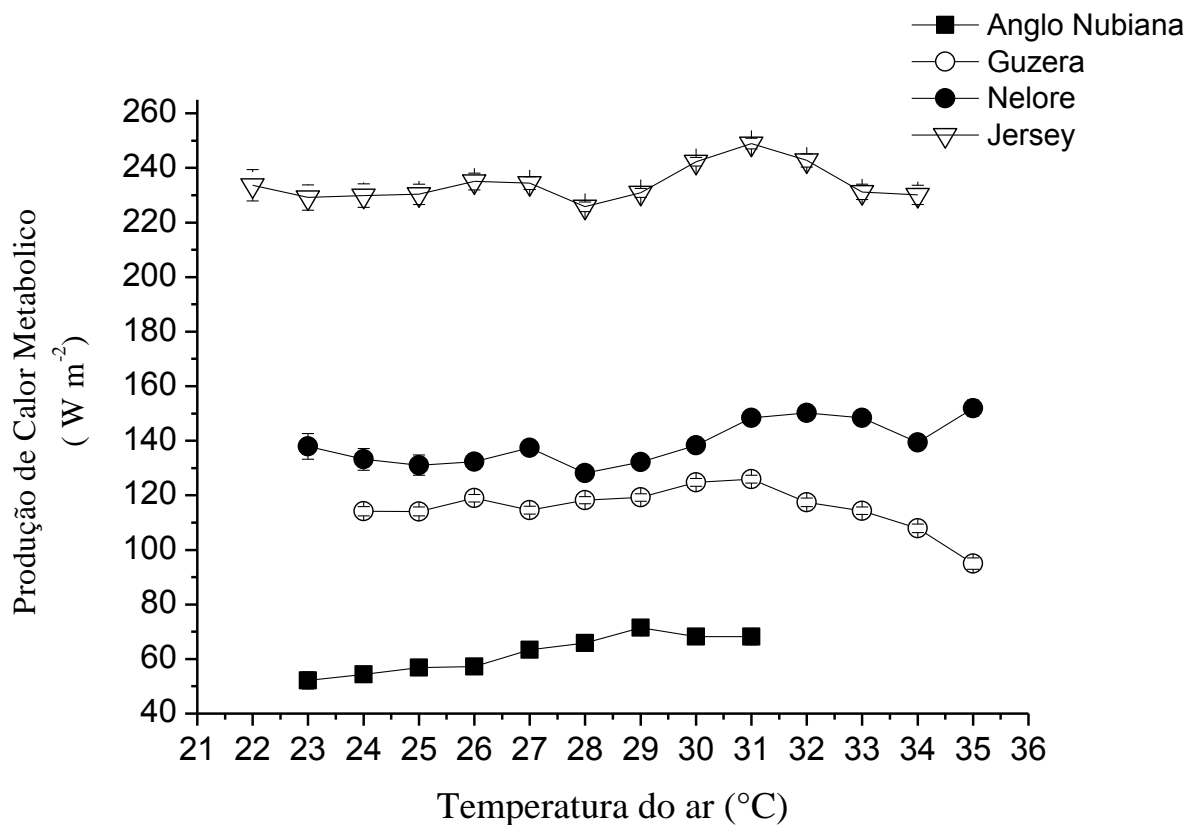


Figura 22. Produção de calor metabólico ( $q''_{met}$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ) em relação a temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos Anglo Nubiana.

#### 5.4. Trocas de calor sensível e latente no sistema respiratório de ruminantes

Em relação às trocas de calor pelo trato respiratório os animais Jersey apresentaram valores de perdas evaporativas e convectivas maiores (Tabela 3). Esta maior evaporação respiratória pode ser explicada pelo fato do gradiente de pressão de vapor entre o trato respiratório e o ambiente ter sido maior no experimento com vacas leiteiras, e também apresentarem uma maior frequência respiratória que influencia em uma maior perda de calor pelo trato respiratório. Isto pode ser devido ao fato do estágio fisiológico das mesmas que se apresentavam em lactação. Maia et al (2005) estudando perdas respiratórias em vacas Holandesas encontrou valores próximos ao encontrados em Jersey , com valores de perda por calor latente em torno de  $25 \text{ W m}^{-2}$  e  $F_R$  de  $50 \text{ resp min}^{-1}$  quando a temperatura do ar era de  $28^\circ\text{C}$ .

Os animais Anglo Nubiana apresentaram uma baixa perda de calor pelo trato respiratório tanto por meios sensíveis como por meios latentes, com valores de  $3,4 \pm 0,05$  e  $0,7 \pm 0,007$ , respectivamente, isto pode ter ocorrido pelo fato desses animais terem sido observados em ambiente fechado sem muita alteração da temperatura do ar e umidade relativa. Maia et al. (2015) avaliando cabras SRD (sem raça definida) no semi árido nordestino encontraram valores de  $q''_{ER}$ ,  $F_R$  e  $V_E$  de  $3 \text{ W m}^{-2}$ ,  $25 \text{ resp mim}^{-1}$  e  $0,15 \text{ L s}^{-1}$ , respectivamente, valores próximos aos observados em Anglo nubiana ( Tabela 3).

O Nelore apresentou uma  $P_{EXP}$  elevada com valores de  $5 \pm 0,01 \text{ W m}^{-2}$  aumentando assim a perda de calor por evaporação respiratória em relação aos mecanismos sensíveis.

Tabela 3. Média geral ( $\pm$  erro padrão), valores mínimos e máximos da temperatura do ar expirado ( $T_{EXP}$ , °C), ventilação ( $V_E$ ,  $L \underline{s}^{-1}$ ), frequência respiratória ( $F_R$ , resp.min<sup>-2</sup>), pressão de vapor do ar expirado ( $P_{EXP}$ , KPa), evaporação respiratória ( $q_{ER}$ ,  $W \text{ m}^{-2}$ ), convecção respiratório ( $q_{CR}$ ,  $W \text{ m}^{-2}$ ), produção de calor metabólico ( $q''_{met}$ ,  $W \cdot \text{m}^{-2}$ ) durante os quatro experimentos.

Variáveis	Espécies/Raças															
	Gado de corte – Guzerá				Gado de corte – Nelore				Caprinos - Anglo Nubiana				Gado leiteiro – Jersey			
	n	media	máx	min	n	média	máx	min	n	média	máx	min	n	média	máx	min
$T_{EXP}$	5178	32,9 $\pm$ 0,03	35,6	27,6	6898	33,1 $\pm$ 0,01	36,0	29,5	3670	31,3 $\pm$ 0,03	35,0	26,0	4829	32,8 $\pm$ 0,02	35,6	27,9
$V_E$	1418	1,03 $\pm$ 0,04	1,6	0,5	4109	1,09 $\pm$ 0,03	1,8	0,62	3073	0,15 $\pm$ 0,001	0,35	0,07	3796	1,4 $\pm$ 0,05	2,2	0,5
$F_R$	3743	24 $\pm$ 0,05	38	15	5562	19 $\pm$ 0,04	30	11	3683	22 $\pm$ 0,13	64	10	5162	38 $\pm$ 0,08	56	20
$P_{EXP}$	3427	3,9 $\pm$ 0,07	4,6	3,04	6025	5,0 $\pm$ 0,01	6,9	3,3	4233	4,0 $\pm$ 0,009	6,2	3,3	4637	3,8 $\pm$ 0,009	5,8	2,4
$q''_{ER}$	1307	8,59 $\pm$ 0,1	16,3	1,7	3847	9,8 $\pm$ 0,06	20,9	1,6	3069	3,4 $\pm$ 0,05	17,2	1,1	3054	23,7 $\pm$ 0,009	60,6	3,7
$q''_{CR}$	1391	0,71 $\pm$ 0,08	1,7	0,06	4378	0,7 $\pm$ 0,007	2,6	0,4	3340	0,7 $\pm$ 0,005	2,0	0,1	3054	2,02 $\pm$ 0,02	8,16	0,3
$q_{met}$	1033	90,8 $\pm$ 0,5	158,4	40,5	4136	146,6 $\pm$ 0,48	268,3	76	2593	62,3 $\pm$ 0,28	147,7	30,4	3054	230,4 $\pm$ 0,85	384	98,2

n = n° de observações

Nota-se na figura 23 que a evaporação respiratória aumenta com o aumento da temperatura do ar, por outro lado há uma diminuição da convecção respiratória isto devido ao fato do gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ) reduzir entre a temperatura do ar expirado e a temperatura do ambiente (Figura 24).

Quando se analisa a perda por convecção respiratória nota-se que a mesma foi pouco significativa em relação ao total das perdas de calor (evaporativa + convectiva) no trato respiratório em todos os animais, obtendo-se valores de convecção respiratória de  $0,71 \pm 0,08$ ;  $0,71 \pm 0,007$ ;  $0,72 \pm 0,005$  e  $2,02 \pm 0,02 \text{ W m}^{-2}$  para os animais Guzerá, Nelore, Jersey e Anglo Nubiana, respectivamente.

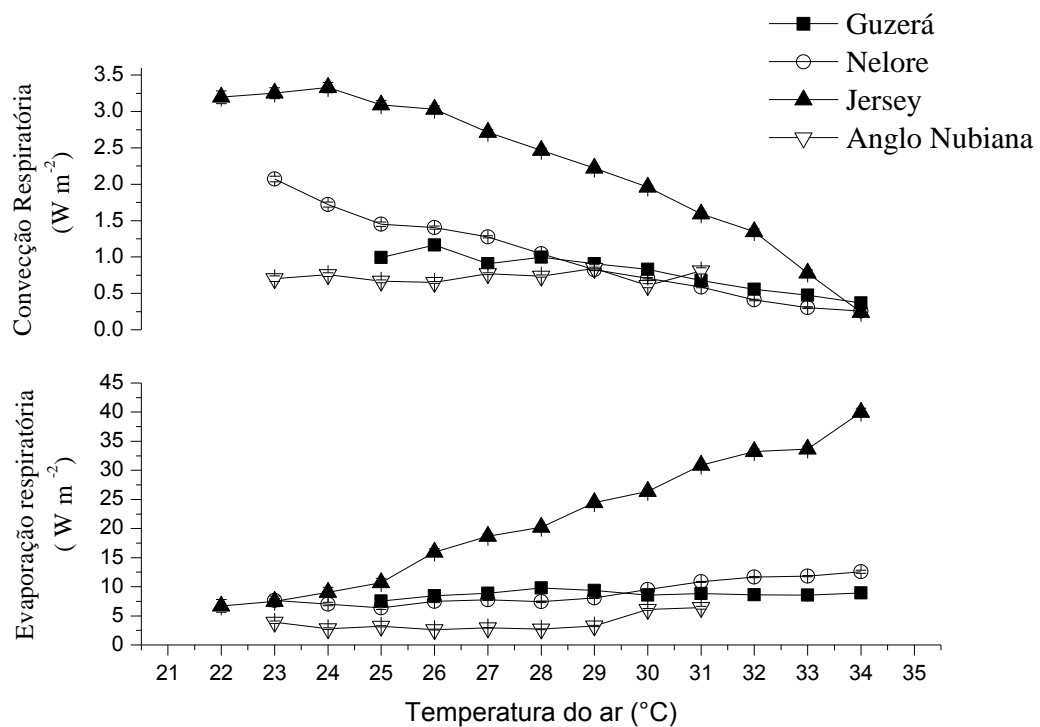


Figura 23. Média por quadrados mínimos da evaporação respiratória ( $q''_{ER}$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ) e convecção respiratória ( $q''_{CR}$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ) em relação a temperatura do ar ( $T_A$ , °C) de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos Anglo Nubiana.

Avaliando o  $\Delta T$  encontrado entre a temperatura do ar expirado e a temperatura do ar (Figura 24), nota-se que o mesmo apresentou gradientes de

temperatura variando não mais que 9°C nas primeiras horas do dia nas quais a temperatura do ar encontrava-se mais baixa. Com o passar da hora do dia esta perda sensível vai se tornando menos eficiente. Como por exemplo, os animais Jersey que as 08:00 hs apresentavam um  $\Delta T$  de 9°C e tinham uma perda respiratória por convecção de  $2,95 \pm 0,02 \text{ W m}^{-2}$ , já as 15:00 h este gradiente de temperatura passou a ser de 1,1 °C as perdas respiratórias passaram a ser  $2,07 \pm 0,04 \text{ W m}^{-2}$ .

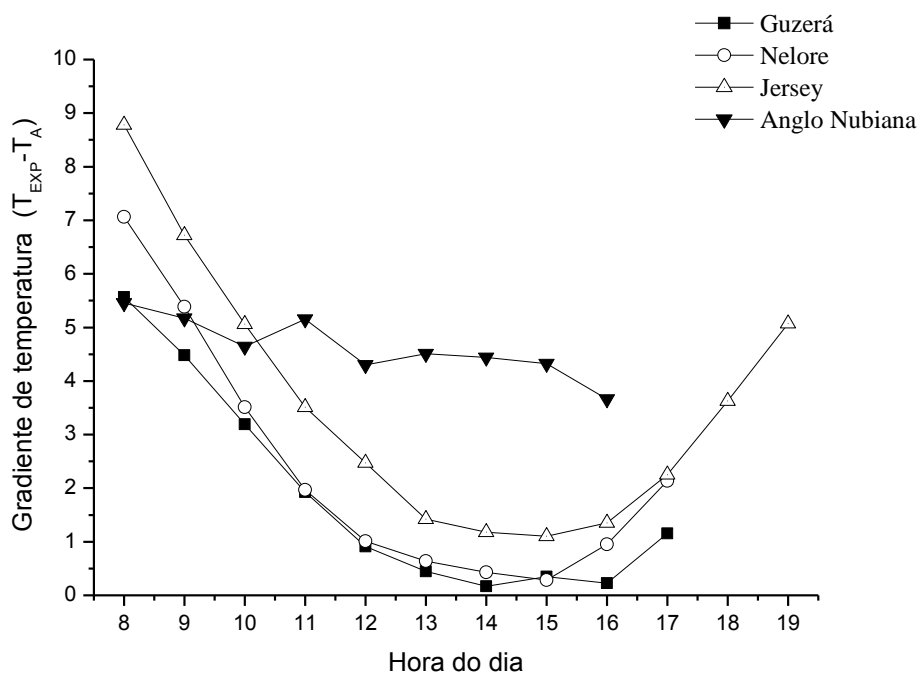


Figura 24. Gradiente de temperatura ( $\Delta T$ , °C) em relação a hora do dia nos experimentos de bovinos das raças Nelore, Guzerá e Jersey e caprinos Anglo Nubiana.

Em relação às equações de regressão múltipla desenvolvidas para estimar o valor de perda respiratória por evaporação utilizando-se parâmetros ambientais e fisiológicos foram plotadas juntamente com os dados observados das raças Guzerá, Nelore, Jersey e Anglo Nubiana nas figuras 25, 26, 27 e 28, respectivamente.

Avaliando as perdas de calor no trato respiratório dos animais Guzerá (figura 25) obteve-se uma equação de regressão múltipla de acordo com a expressão:

$$q'_{ER} = -13,14 + 0,635T_A - 6,166P_{ATM} + 0,842F_R ,$$

com um  $R^2=0,64$ . Este modelo para a faixa de temperatura na qual se encontram os animais Guzerás apresentou uma função linear e levou em consideração os fatores de temperatura do ar ( $T_A$ , °C), pressão de vapor atmosférico ( $P_{ATM}$ , KPa) e frequência respiratória ( $F_R$ , resp  $\text{min}^{-1}$ ). Todos os termos da equação foram estatisticamente significantes ( $p < 0,001$ ).

Esses animais obtiveram evaporação respiratória variando de  $5 \text{ W m}^{-2}$  para até aproximadamente  $45 \text{ W m}^{-2}$  quando a temperatura variou de 22 para  $36 \text{ °C}$ .

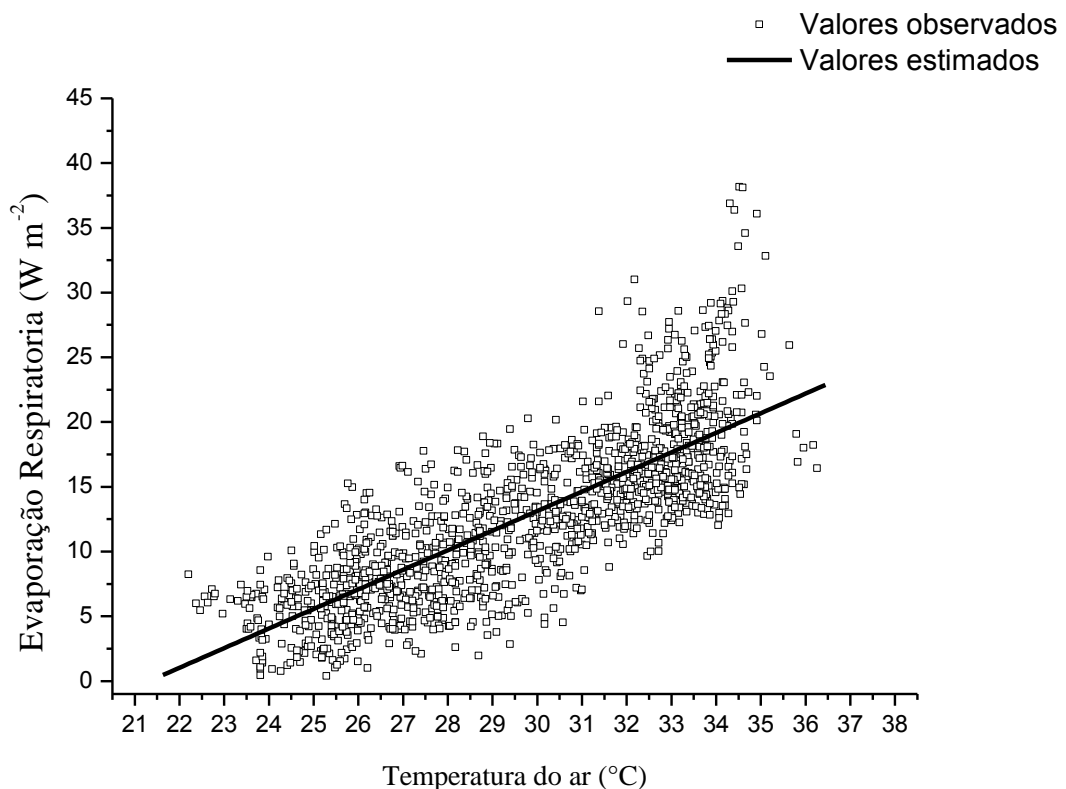


Figura 25. Evaporação respiratória ( $q''_{er}$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ) em relação à temperatura do ar de bovinos da raça Guzerá.

Os animais da raça Nelore apresentaram uma equação de regressão múltipla que evidencia o aumento da evaporação respiratória com o aumento da temperatura do ar de acordo com a seguinte expressão:

$$q''_{ER} = -17,29 + 0,936T_A - 1,00P_{ATM} + 0,08F_R$$

com  $R^2 = 0,66$ . Esta função está representada pela linha sólida juntamente com os dados observados no Nelore (Figura 26). Nesta equação também foram levadas em consideração as variáveis independentes de temperatura do ar ( $T_A$ , °C), pressão de vapor atmosférico ( $P_{ATM}$ , KPa) e frequência respiratória ( $F_R$ , resp  $\text{min}^{-1}$ ). Todos os termos da equação foram estatisticamente significantes ( $p < 0,001$ ).

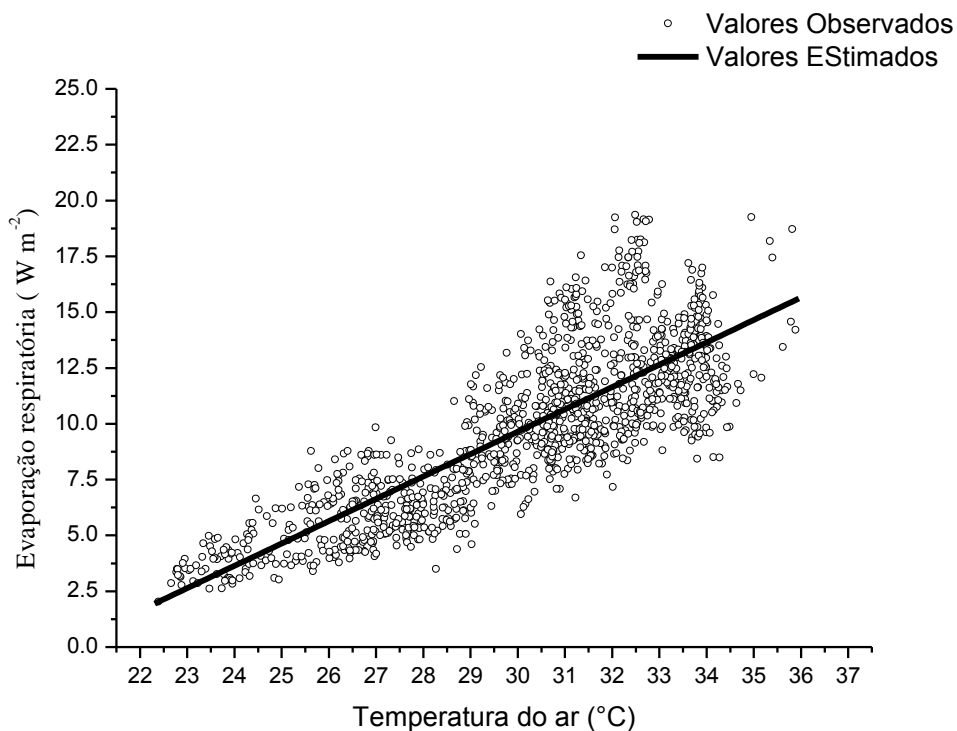


Figura 26. Evaporação respiratória ( $q''_{er}$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ) em relação à temperatura do ar (°C) de bovinos da raça Nelore.

As perdas evaporativas em vacas da raça Jersey, apresentaram uma relação linear nesta faixa de temperatura. Nestes animais a equação de regressão para estimar a evaporação respiratória foi:

$$q''_{ER} = -48,81 + 2,13T_A + 4,11P_{ATM} + 0,161F_R$$

Com um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,53$ . Todos os termos da equação foram estatisticamente significantes ( $p < 0,001$ ). Berman, (2006) avaliando a eficiência de resfriamentos evaporativos, afirmou que a perda de calor pelo trato respiratório estão fortemente ligadas as condições ambientais como temperatura do ar e umidade relativa, porém outros fatores que deveria ser considerados seriam a frequência respiratória e o volume respiratório corrente que seriam respostas fisiológicas dos animais ao efeitos do ambiente.

A aplicação desta função juntamente com os dados observados no experimento com as vacas Jersey está representada com uma linha sólida, na figura 27. Maia et al. (2005) encontraram uma equação para estimar a evaporação respiratória em vacas holandesas com uma melhor previsão de  $R^2 = 0,94$  porém considerando apenas a temperatura do ar.

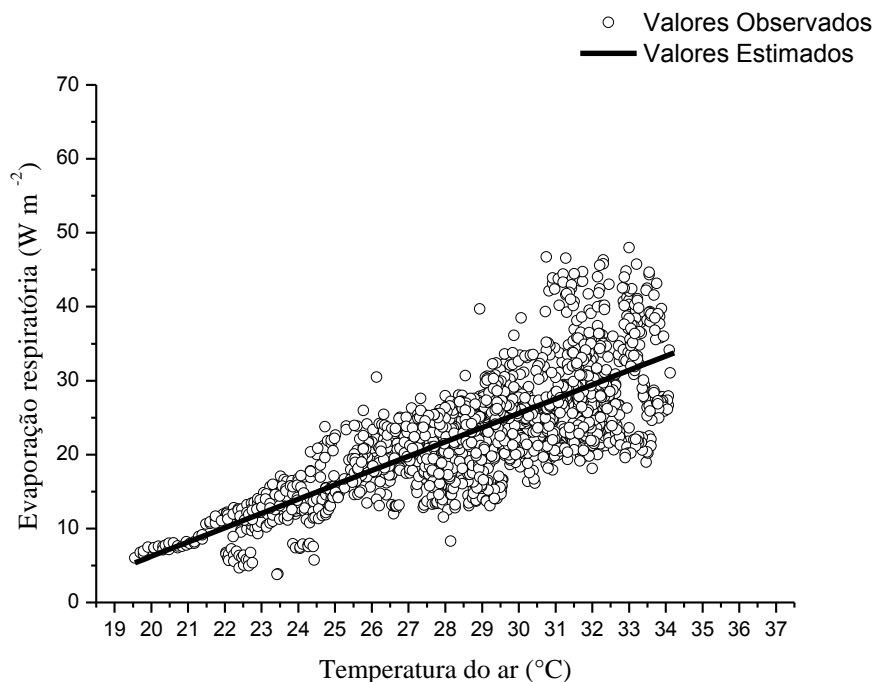


Figura 27. Evaporação respiratória ( $q''_{er}$ ,  $W m^{-2}$ ) em relação à temperatura do ar de vacas da raça Jersey.

Em relação às perdas de calor latente no trato respiratório de caprinos da raça Anglo Nubiana foi estimada a seguinte equação:

$$q''_{ER} = 42,72 + 1,18T_A - 8,29P_{ATM}^2 + 0,1275F_R - 1,315T_R$$

Com um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,6884$ . Todos os termos da equação foram estatisticamente significantes ( $p < 0,001$ ).

Nota-se um aumento da evaporação respiratória quando a temperatura do ar fica superior a  $27^\circ\text{C}$  (Figura 28). Jessen e Mercer (1979) avaliando cabras em exercício encontraram equações lineares com um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,84$  para evaporação respiratória levando em consideração a temperatura retal apenas, no qual foi observado um aumento das perdas de calor por evaporação no trato respiratório com o aumento da temperatura retal.

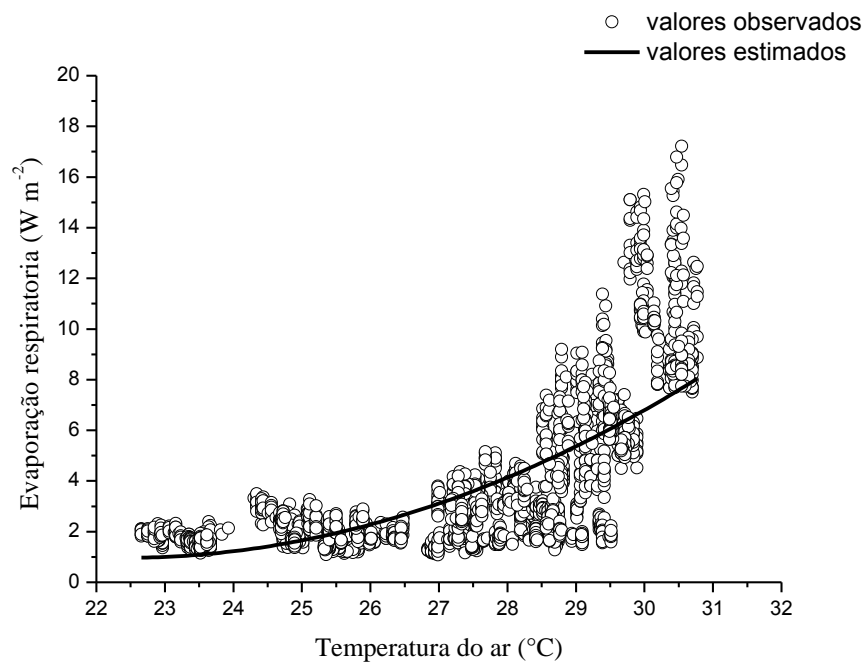


Figura 28. Evaporação respiratória ( $q''_{er}$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ) em relação à temperatura do ar de caprinos da raça Anglo Nubiana.

Esses resultados mostram que modelos de regressão múltipla considerando variáveis ambientais e fisiológicas de fácil mensuração apresentaram um  $R^2$  alto em todas as raças e espécies, podendo assim ser utilizados para estimar as perdas de calor no trato respiratório de forma mais precisa.

## 6. CONCLUSÃO

- Avaliações de espirometria e calorimetria indireta com utilização de máscara facial em animais de produção em ambiente não controlado mostra-se eficientes para as espécies estudadas;
- Relação entre peso e variáveis fisiológicas de animais da família Bovidae mostra-se em uma função alométrica para frequência respiratória e porcentagem de  $O_2$  expirado;
- Modelos de regressão apresentados para estimar a evaporação respiratória em bovinos da raça Guzerá, Nelore, Jersey e caprino da raça Anglo Nubiana utilizando parâmetros ambientais e fisiológicos se mostra bem eficientes nestas condições;
- O conhecimento das funções fisiológicas como frequência respiratória, volume respiratório corrente, ventilação e trocas gasosas como também uma avaliação das trocas térmicas ocorridas no trato respiratório em animais submetidos as variações naturais do ambiente de criação de animais de ruminantes possibilita o desenvolvimento de biossensores como ferramenta para otimização e controle de ambiente térmico na produção animal

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBURQUEQUE-NETO, C. Modelo Integrado dos Sistemas Térmico e Respiratório do Corpo Humano. **(Tese)**. São Paulo- SP. 2010.

AL-TAMINI H.J. Thermoregulatory response of goat kids subjected to heat stress. **Small Ruminant Research** v.71, p.280-285, 2007.

BERMAN, A. Extending the potencial of evaporative cooling for heat stress relief. **J. Dairy Sci.** v89, p.3817-3825, 2006.

BRASIL, L.H.A. et al., Efeitos do Estresse Térmico Sobre a Produção, Composição Química do Leite e Respostas Termorreguladoras de Cabras da Raça Alpina. **Rev. Bras. Zootec.**, 29(6):1632-1641, 2000.

BROCKWAY JM, MCDONALD JD, PULLAR JD (1965) Evaporative heat-loss mechanisms in sheep. **J Physiol (London)** 179:554-568

COLE, G.W.; SCOTT, N.R. A mathematical model of the dynamic heat transfer from the respiratory tract of a chicken. **Bulletin of Mathematical Biology** volume 39, 1977.

COLLINS, J.C., PILKINGTON, T.C., SCHIMIT-NIELSEN, K. A model of respiratory heat transfer in a small mammal. **Biophys. J.** v.11, p. 886-914, 1971.

COSTA D, JAMINI M. (2001) Bases fundamentais da espirometria. **Rev. bras. fisioter.** 5:95-102

ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J. Transferência de calor e massa – uma abordagem prática. MCGRAW-HILL BRASIL, 3 ed. 906 pag., 2009.

Da SILVA, R.G.; LaSCALA, N. JR.; LIMA FILHO, A.E.; CATHARIN, M.C. Respiratory heat loss in the sheep: a comprehensive model. **Int J. Biometeorology** 46:136-140, 2002.

Da SILVA RG; STARLING JMC (2003) Evaporação cutânea e respiratória em ovinos sob altas temperaturas ambientes [Cutaneous and respiratory evaporation in sheep at high ambient temperatures]. **Brazil J Animal Science** 32:1956-1961

Da SILVA, R.G., CAMPOS MAIA, A.S. **Principles of Animal Biometeorology** (2013). Brasil Ed.Springer. DOI 10.1007/978-94-007-5733-2, Volume 2, 261 pg.

DITTUS, P.W.; BOELTER, L.M.K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type. **Int Comm Heat Mass Transfer** 12:3-22, 1985.

Diener, J.R.C. Calorimetria indireta. **Rev. Assoc. Med. Bras.** 43:245-253, 1997.

ENRIGHT, P.L.; JOHNSON L.R.; CONNETT J.E., HELEN VOELKER, H.; A. SONIA BUIST, A.S. Spirometry in the Lung Health Study: 1. Methods and Quality Control **Am Rev Respir Dis.** 1ª ed. December 17, 2012 as doi:10.1164/ajrccm/143.6.1215

FERRUS, L.; GUENARD, H.; VARDON, G.; VARENE, P. Respiratory water loss. **Respiration Physiology** (1980) 39, 367-381 Elsevier/North-Holland Biomedical Press

FERRANNINI, E. (1988) **The Theoretical Bases of Indirect Calorimetry: A Review.** Grune & Stratton, Inc.

Finch, V.A.; Dmiel, R.; Boxman, R.; Shkolnik, A.; Taylor, C.R. Why black goats in hot deserts? Effects of coat color on heat exchanges of wild and domestic goats. **Physiol Zool** 53:19–25, 1980.

FINCH, V.A. Comparison of non-evaporative heat transfer in different cattle breeds. **Aust J Agric Res** 36:497-508, 1985

Findlay, J.D. The respiratory activity of calves subjected to thermal stress. **J. Physiol.** 1: 300-309, 1957.

FIOROT, D., FARIA, A.C.D.; NASCIMENTO, P.S.; LOPES, A.J.; JANSEN, J.M.; MELO, P.L. Validação do uso da técnica de oscilações forçadas no diagnóstico da doença pulmonar obstrutiva crônica IFMBE Proceedings ... **IV Latin American Congress on Biomedical Engineering** 2008, Bioengineering Solutions for Latin America Health

LITTELL, R.C.; FREUND, R.J. (1991) **SAS System for Regression.** SAS Institute, Inc.

GANONG, W.F. **Review of Medical Physiology** (1983) 11ª Ed. Lange Medical Publications. Los Altos, California EUA.

GETTY, R. **Anatomia dos Animais Domésticos.** (1986) 5ª ed. Guanabara – Koogan. Rio de Janeiro. ISBN 978-8-527-71438-9

GUYTON, A.C. **Medical Physiology** (2006). 11ª Ed. Elsevier. Philadelphia, Pennsylvania. ISBN 0-7216-0240-1

GNIELINSKI, V (1976) New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. **Ind Chem Eng** 16:359-368

HALLIDAY, D.; WALKER J. RESNICK, R. **Fundamentos de Física 2 - Gravitação, Ondas, Termodinâmica** (2012) , 8ª Ed. P. 352 LTC.

HAMMARLUND K, RIESENFELD T, SEDIN G (1986) Measurement of respiratory water loss in newborn lambs. *Acta Physiol Scand* 127:61-65

HANNA, L.M. Modelling of heat and water vapor transport in the human respiratory tract. Tese. Universidade da Pensylvania. USA . 1983.

HALES, J.R.S.;WEBSTER,M.E.D. Respiratory function during thermal tachypnoea in sheep. **J. Physiology**, 190:241-260, (1967).

HARVEY, W.R. (1960) **Least-squares analysis of data with unequal subclass numbers**. Beltaville: USDA

HOFMEYR HS, GUIDRY AJ, WALTZ FA (1969) Effects of temperature and wool length on surface and respiratory evaporative losses of sheep. *J Applied Physiol* 26:517-523

HOPPELER, H.; WEIBEL, E.R. Scaling functions to body size: theories and facts. **The journal of Experimental Biology**, 208:1573-1574, 2005.

INCROPERA, F.P. et al. (2012) **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Ed. LTC, Rio de Janeiro, RJ. p. 642.

INGENITO, E.P; SOLWAY J.;, MCFADDEN E. R.; PICHURKO B. M.; CRAVALHO E.G.; DRAZEN, J.M. Finite difference analysis of respiratory heat transfer. **American Physiological Society**. 1986 DOI 0161-7567/86.

JAMES A.; MCNAMARA JR. (1981) Influence of Respiratory Pattern On Craniofacial Growth. **The Angle Orthodontist**: October 1981, Vol. 51, No. 4, pp. 269-300.

KLEIBER M (1947) Body Size and Metabolic Rate. In: **Physiological Reviews** 27: 511-541

KRISTÍN,P., GVOŽDÍK. L. Influence of respirometry methods on intraspecific variation in standard metabolic rates in newts. **Comparative Biochemistry and Physiology**, Part A, 2012.

KROG A (1916) **The respiratory exchange of animals and man**. LONGMANS, GREEN AND CO. LONDON

LEITH, D.E. Mammalian tracheal dimensions: scaling and physiology. **J Applied Physiol** 55:196-200, 1982.

MAIA, A.S.C.; SILVA, R.G.; LOUREIRO, C.M.B. Respiratory heat loss of Holstein cows in a tropical environment. **International Journal of Biometeorology**, v.49, n.5, pg. 332-336, 2005.

MAIA, A.S.C. et al.(2015) Thermoregulatory responses of goats in hot environments. **Int J Biometeorol**. DOI 10.1007/s00484-014-0916-3.

McARTHUR, A.J. Thermal interaction between animal and microclimate: a comprehensive model. **J Theor Biol** 126:203-238, 1987.

McDOWELL, R.E. et al. (1953.) Respiratory activity as an index of heat tolerance in Jersey and Sindhi x Jersey(F1) crossbreed cows.

McMANUS, C. et al. Heat tolerance in naturalized Brazilian cattle breeds. *Livestock Science* 120:256-264, 2009.

McLEAN, J.A. The partition of insensible losses of body weight and heat from cattle under various climatic conditions. *J Physiol (London)* 167:427-447, 1963

MORTOLA, J.P.; LANTHIER, C. Breathing frequency in ruminants: a comparative analysis with non-ruminant mammals **Respiratory Physiology & Neurobiology** 145 (2005) 265–277

MITCHELL B et al. Relationship between body weight and tidal volume during general anaesthesia in sheep, cattle, pigs and horses. **Veterinary Anaesthesia and Analgesia**. 3:56–60, 1972.

MUNSON, B.R. (2004) **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. 4ªEd São Paulo: Edgard Bluncher. São Paulo – SP ISBN:85-212-0343-8.

MURRISH, D.E. Respiratory heat and water exchange in Pinguins. **Respiratory Physiology**. V.19, p 262-270, North-Holland Publish Company, Amsterda. 1973.

NASCIMENTO, S.T. **Modelagem do equilíbrio térmico de frangos de corte: um estudo da geração e transferência de calor**. Tese (doutorado)- Universidade Estadual Paulista, UNESP Jaboticabal, SP, 2015.

NIELSEN, K.S. **Fisiologia Animal**. (2002), 5ª ed. Ed. Santos.

NUSSELT W (1931) Der Wärmetausch zwischen Wand and Wasser in Rohrer. **Forsch Geb Ingenieurwes** 2:309-312

PAULILO, G.; TEIXEIRA, M.D. Capítulo II Harmônicos – conceitos **O setor elétrico**, Ed 85 Atitude Editora, fev. São Paulo – SP 2013.

PENNES, H. H. Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperatures in the Resting Human Forearm. **Jour. Appl. Physiol.**, v. 1, p.93-122, 1948.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K.S.(2002) **Física 3**, 5ª Edição, LTC Editora, Rio de Janeiro.

ROBERTSHAW, D. Mechanisms for the control of respiratory evaporative heat loss in panting animals. **J. Appl. Physiol.** 101: 664-668, 2006.

SAS Institute (1995) **User's guide: Statistics**, Version 6,10 edition. SAS Institute Inc, Cary, NC

SCHIMIDT-NIELSEN K (2010) **Animal Physiology: adaptation and environment**. Cambridge University, London.

SIEDER, E.N.; Tate, E.G. (1936) Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes. **Ind Eng Chem** 28:1429

SOBOTTA, J. **Atlas de Anatomia Humana** (2013) - Vol.2 - 23ª Ed. Guanabara – Koogan. Rio de Janeiro.

SILVA, R.G. (2000) **Introdução à biometeorologia**. São Paulo: Nobel, 286p.

SPURK, J.H.; AKSEL, N. (2008) **Fluid Mechanics**. 2ªEd. Springer; New York – NY. e-ISBN 978-3-540-73537-3.

STEVENS DG (1981) A model of respiratory vapour loss in Holstein dairy cattle. Transactions of the ASAE 24:151-158

SVERDLOVA NS, LAMBERTZ M, WITZEL U, PERRY SF (2012) Boundary Conditions for Heat Transfer and Evaporative Cooling in the Trachea and Air Sac System of the Domestic Fowl: A Two-Dimensional CFD Analysis. **PLoS ONE** 7(9): e45315. doi:10.1371/journal.pone.0045315

TENNEY WM, BARTLETT D JR (1967) Comparative quantitative morphology of the mammalian lung: trachea. **Respiratory Physiol** 3:130-135

TURNER HG, THORNTON RF (1966) A respiration chamber for cattle. **Proc Australian Soc Animal Production** 6:413-419

TSU, M.E; BABB,A.L; RALPH, D.D; HLASTALA, M.P. Dynamics of heat, water, and soluble gas exchange in the human airways: a model study. **Annals of Biomedical Engineering**, Vol. 16, pp. 547-571, 1988.

WATANABE M J (2007) Avaliação espirométrica de cavalos da raça Puro Sangue Árabe durante teste padrão de exercício progressivo em esteira. Dissertation, São Paulo University

WALKER JEC, Wells RE, Merrill EW (1961) Heat and Water Exchange in the Respiratory Tract. **Am. J. Med.** 30:259-67

WISSLER, E.H. Steady-State Temperature Distribution in Man. **Jour. Appl. Physiol.**, 16, 734-740, 1961.

WYLEN, V.; GORDON, J. (1995). **Fundamentos da Termodinâmica Clássica.** 4ªEd.

YOUNG BA (1975) Temperature induced changes in metabolism and body weight of cattle (*Bos taurus*). **Can J Physiol Pharmacol** 53:947-953

ZEUTHEN E (1953) Oxygen uptake as related to body size in organism. In: **The quarterly Review of Biology.** 28:1-12